Aus der Abteilung Dermatologie III
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. H. Fischer
der Hautklinik der Universität Tübingen

Die Methodik der Druck-Volumen-Messung zur Bestimmung der Kompressionswirkung von Strümpfen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

vorgelegt von

Hans-Martin Ebert
aus Stuttgart

1981

Aus der Abteilung Dermatologie III
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. H. Fischer
der Hautklinik der Universität Tübingen

Die Methodik der Druck-Volumen-Messung zur Bestimmung der Kompressionswirkung von Strümpfen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

der
MEDIZINISCHEN FAKULTÄT
(Klinische Medizin)
der Eberhard-Karls-Universität
Tübingen

vorgelegt von

Hans-Martin Ebert
aus Stuttgart

1981

Dekan: Professor Dr. G. Rassner
1. Berichterstatter: Professor Dr. H. Fischer
2. Berichterstatter: Professor Dr. H.-E. Hoffmeister

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Offsetdruck Spengler
Lessingstraße 4 · 7401 Neustetten 1
Telefon (07472) 22145

Die Methodik der Druck-Volumen-Messung zur Bestimmung der Kompressionswirkung von Strümpfen

I N H A L T S V E R Z E I C H N I S Seite

1 E i n l e i t u n g u. Problemstellung 1

1.1 Entwicklung der äußeren Andruckmessung 1.2 Entwicklung der inneren Andruckmessung 1.3 Theorie dieses Verfahrens 1.4 Ziele dieser Untersuchung

2 M a t e r i a l 4

2.1 Versuchspersonen - Beinmaße
2.2 Geräte 2.2.1 Volumenmessung 2.2.2 Druckmessung 2.2.3 Automatische Versuchsaufzeichnung
2.2.4 Staumanschette 2.2.5 Lagerung 2.2.6 Kompressionsstrümpfe

3 Komponenten der Druck-Volumen-Messung bei der Strumpfdruckbestimmung - Voruntersuchung 7

3.1 Staudruck und Venendruck
3.2 Venendruckfortpflanzung
3.3 Strumpfdruck und Gewebsdruck
3.4 Strumpf- und Gewebshysterese
3.5 Volumenmeßgeräte 3.5.1 Vergleich im Druck-Volumen-Versuch 3.5.2 Nullinienkonstanz 3.5.3 Temperaturempfindlichkeit
3.6 Lagerung

4 Verfahren - Versuchsanordnung, Durchführung, Auswertung 45

4.1 Umgebungsbedingungen 4.2 Ankopplungsfaktor der Oberschenkelstaumanschette 4.3 Lagerung 4.4 Volumenmessung 4.5 Staudruck 4.6 Reihenfolge 4.7 Auswertung

5 Untersuchung des Verfahrens 51

Versuche - Ergebnisse - Diskussion

6 Z u s a m m e n f a s s u n g 60

Literaturverzeichnis 61

INHALTSVERZEICHNIS

1 Einleitung u. Problemstellung

1.1 Die exakte Feststellung von Druckwerten, mit denen ein Kompressionsstrumpf auf ein Bein wirkt, ist eine frühe Forderung von Ärzten und auch Strumpfherstellern(1). Die Entwicklung begann 1955 van der Molen(55) mit systematischen Andruckmessungen. In der Folgezeit verlagerte sich die Problemlösung mit der wachsenden Kompliziertheit der Meßapparaturen unter weitgehender Loslösung von der Besonderheit der inneren und äußeren Strukturen des menschlichen Beines aus den Händen der Ärzte(6,7,20,26,43,44,45, 46,57,70,73,74) vermehrt in die Laboratorien von Materialprüfungsinstituten(40,76,78). Auch nach der Verringerung bzw. der Normierung des Abhubfehlers blieb wegen der Radiusabhängigkeit, die als schwerwiegender Nachteil sämtlichen punktförmigen Druckmeßverfahren anhaftet, die Aussagekraft und Gültigkeit beschränkt. Um nun zu untersuchen, ob ein Strumpf wirklich am individuell verschiedenen Patientenbein paßt, mußten andersgeartete Verfahren der Strumpfandruckmessung gesucht werden.

1.2 Mit der erleichterten Anwendbarkeit der Plethysmographie(10,24,25,38,50,79) wurde ein völlig neuer Weg zur Messung der Strumpfandruckwirkung beschritten. Adam, Barbey und Brecht(8,9,11) stauten den venösen Abfluß am Bein in 10-Torr-Stufen bis 100 Torr bei gleichzeitiger Volumenmessung mit einem speziellen Plethysmographen und erhielten Druck-Volumen-Diagramme von Venengesunden und Venenkranken(30). Als der passende Kompressionsstrumpf wurde ohne Ermittlung äußerer Andruckwerte derjenige bezeichnet, der die Druck-Volumen-Kurve des Venenpatienten in den Normbereich des Venengesunden verlagert. Das Druck-Volumen-Diagramm und die bei fortlaufender Registrierung entstehende Druck-

Volumen-Schleife(60,67) erlauben schon vergleichende Aussagen zur Andrucksqualität bei Strümpfen und Kompressionsverbänden(28,63,64).

1.3 Fischer und Müller(33) faßten die Theorie, nach der es möglich sein muß, exakte Druckwerte als Wirkung von Kompressionsstrümpfen zu messen, wie folgt zusammen: "Die Druck-Volumen-Schleife kann ferner Auskunft über Dehnungsqualitäten komprimierender Maßnahmen geben, insbesondere erlaubt sie genauere Aussagen über Andruck und Kompression elastischer Strümpfe, unabhängig von der Krümmung (Abb.1). Das Beinvolumen kann erst zunehmen, wenn der (durch Stauung erzeugte) Druck von innen den äußeren Widerstand überwindet (echter globaler Andruck bei "a" im ansteigenden Schenkel der Abb.1)."

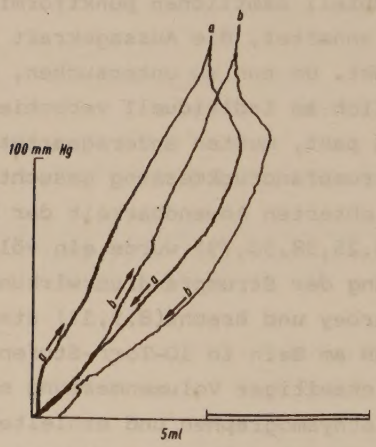


Abb. 1 Druck-Volumen-Schleife aus (26)
a = mit Gummistrumpf, b = ohne Gummistrumpf

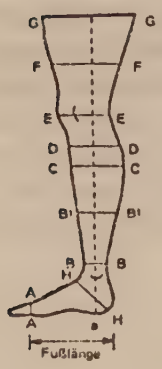
1.4 Es ist nun von entscheidender Bedeutung, die abgestufte Druckwirkung von Kompressionsmaßnahmen auf das venöse System und damit ihren Einfluß auf die

Geschwindigkeit des venösen Rückstroms zu kennen. In der vorliegenden Untersuchung wurde dazu plethysmographisch der Punkt ermittelt, an welchem ein Segment des Strumpfes unter einem bestimmten venösen Innendruck nachgibt und sich ausdehnt. Dabei sollte zunächsteinmal die Wertigkeit, die Fehlermöglichkeiten, die Reproduzierbarkeit und die Schwankungsbreite ermittelt werden. Dazu wurden Strümpfe der niederen Kompressionsklassen, zur Thromboseprophylaxe verwendete sogenannte "Bettstrümpfe" benützt, deren therapeutische Wirksamkeit im Augenblick besonders diskutiert wird.

2 Material

2.1 Versuchspersonen

Zur ständigen Verfügung standen zwei männliche gefäßgesunde Versuchspersonen; Person A war 29 Jahre, Person B 23 Jahre alt. Gemessen wurde jeweils nur das rechte Bein. Beinmaße siehe Tabelle 1.



Umfangmaße:			Längenmaße:		
V.P.:	A	B		A	B
G	52	54	a-G	80	77
F	42,5	50	a-F	62,5	65
E	36	38	a-E	50	49
D	34,5	33	a-D	43,5	43,5
C	35	40	a-C	35,5	33
B^1	30	34,5	a-B^1	26	23,5
B	22,5	24	a-B	13,5	13,5
H	33	34	Fußlänge:		
A	24,5	25	A-H	19	18

Tab.1: Beinmaße in cm.

2.2 Geräte

2.2.1 Volumenmessung

Zur Volumenmessung wurde der Luftsegmentplethysmograph "Vasoscript" nach Barbey (10) in Verbindung mit einer Leinenmanschette mit grünem Gummiinlett (16) (Hersteller Fa. Boucke, Tübingen) benützt.
Zum Gerätevergleich (Kap. 4.5) diente der Dehnungsmeßstreifenplethysmograph "Periquant"(42) der Fa. Gutmann, Eurasburg.

2.2.2 Druckmessung[x]

Für die gröbere Messung des Staumanschettendruckes und für Drucke über 60 Torr (8kPa) kamen geeichte Membranmanometer und Quecksilbermanometer, wie sie

zur Blutdruckmessung nach Riva-Rocci üblich sind, zur Anwendung. Die feinere Druckmessung und die blutige Messung des Venendrucks ließ ein mechanisch-elektrischer Druckwandler P 37 B der Fa. Statham, Oxnard, California in Verbindung mit einem Vorverstärker MA 170 Hg[x] der Fa. Hellige, Freiburg i.Br. zu.

2.2.3 Automatische Versuchsaufzeichnung

Zur Aufzeichnung des Volumens, des Manschettendrucks, und des blutig gemessenen Drucks wurde ein Mehrkanal-Vielfachschreiber der Fa. Watanabe, Japan verwendet.

2.2.4 Staumanschette

Zur Stauung des venösen Abflusses diente eine 12 cm breite konische Oberschenkelstaumanschette. Der zugehörige Ankopplungsfaktor wurde mit einem Doppler-Strömungsmeßgerät ermittelt.

2.2.5 Äußere Andruckmessung

Zur Kontrolle des Andrucks der Strümpfe sowie zur Kontrolle der Beieinflußbarkeit der venösen Druckfortpflanzung wurden Plastikringschläuche, die wie ein Doppelwandzylinder verschweißt waren, verwendet. Zum dosierten Aufpumpen war die Plastikmanschette über einen Schlauch mit einem Manometer verbunden.

2.2.6 Lagerung

Das Bein wurde auf einer Braunschen Schiene gelagert, wobei die Ferse mit einem Reissäckchen und die laterale Kniekehle mit einem Stück Schaumgummi gepolstert war.

x Die Messungen wurden vor Ablauf der Übergangsbestimmungen der "Ausfürungsverordnung zum Gesetz über Einheiten im Meßwesen vom 26.Juni 1970" vorgenommen. Sämtliche Druckmeßgeräte zeigten in "Torr" an, abgelesen und Berechnungen durchgeführt wurden in "Torr", die gegebenenfalls in "Pa" bzw. "kPa" umgerechnet werden.

2.2.7 Kompressionsmethode

Gemessen wurden Kompressionsstrümpfe bzw. Thromboseprophylaxestrümpfe verschiedener Hersteller, deren Kompression als ungefähr im Bereich der Kompressionsklasse I angegeben wurde. Bei Strumpf I handelt es sich um Struva III (Hersteller Fa. w e c o Weihermüller & Voigtmann, Bayreuth), Strumpf II um T E D medium regular (Vertrieb Fa. Kendall, Neustadt/Donau), Strumpf III um Cambren Größe II (Vertrieb Fa. Hartmann AG, Heidenheim).

3 Komponenten der Druck-Volumen-Messung bei der Strumpfdruckbestimmung - Voruntersuchung

3.1 Staudruck und Venendruck

Bei dem Verfahren der Druck-Volumen-Schreibung wird der venöse Druck unblutig über den Staumanschettendruck bestimmt. Dies setzt jedoch die Kenntnis der Druckfortpflanzung Staumanschette - tiefe Beinvene voraus, da der Druck in der Oberschenkelstaumanschette ebenso wie der arterielle Druck(2) nicht mit dem Druck im gestauten venösen System gleichzusetzen ist(15,37,52,60). Deshalb gilt der erste Versuch der Frage, wie ein bestimmter Druck in der Staumanschette den Venendruck und deshalb auch das Beinvolumen beeinflußt.

Der Proband (A) wurde auf einer flachen Liege gelagert; das rechte Bein wurde mit einer Braunschen Schiene auf eine mittlere Wadenhöhe von 37 cm und eine mittlere Fesselhöhe von 45 cm über der Liege bei leicht gebeugtem Knie, freier Kniekehle und etwas nach außen rotiertem Fuß eingestellt. Das Volumen der Fessel wurde luftsegmentplethysmographisch gemessen und zusammen mit dem Druck in der Staumanschette und dem blutig gemessenen Druck in der Großzehenvene mit Statham-Elementen (P 37 B für den Venendruck) über einen Mehrkanalschreiber aufgezeichnet. Die Höhe der Einstichstelle und des Druckdoms war 71 cm über der Liege. Gestaut wurde mit der Oberschenkelmanschette bis zur Einstellung eines Gleichgewichtes zwischen zu- und abströmendem Blut in Druckstufen von 5 Torr (0,67kPa) von 0 auf 100 Torr (13,3 kPa) und in Druckstufen von 10 Torr (1,3 kPa) wieder abgelassen. Wiederholt wurde dieser Versuch mit Strumpf III.

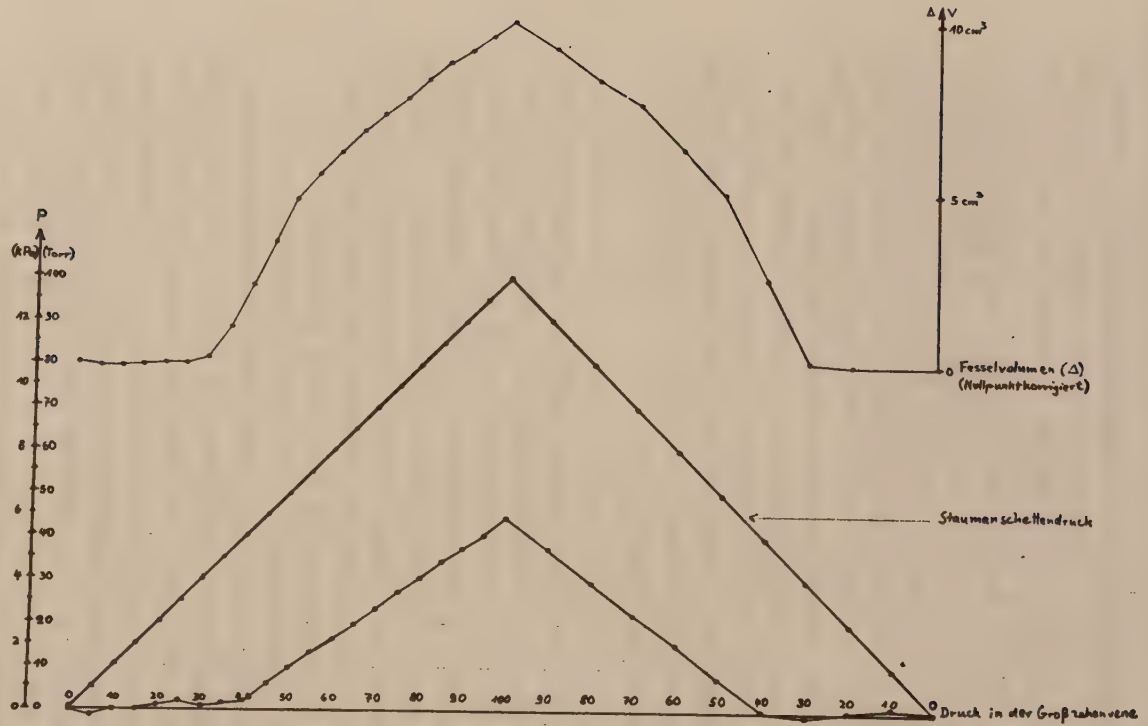


Abb. 2a: Blutige Venendruckmessung – untere Kurve: Druck in der dorsalen Großzehenvene
mittlere Kurve: Staumanschlußdruck obere Kurve: Fesselvolumen (nullpunktkorrigiert)

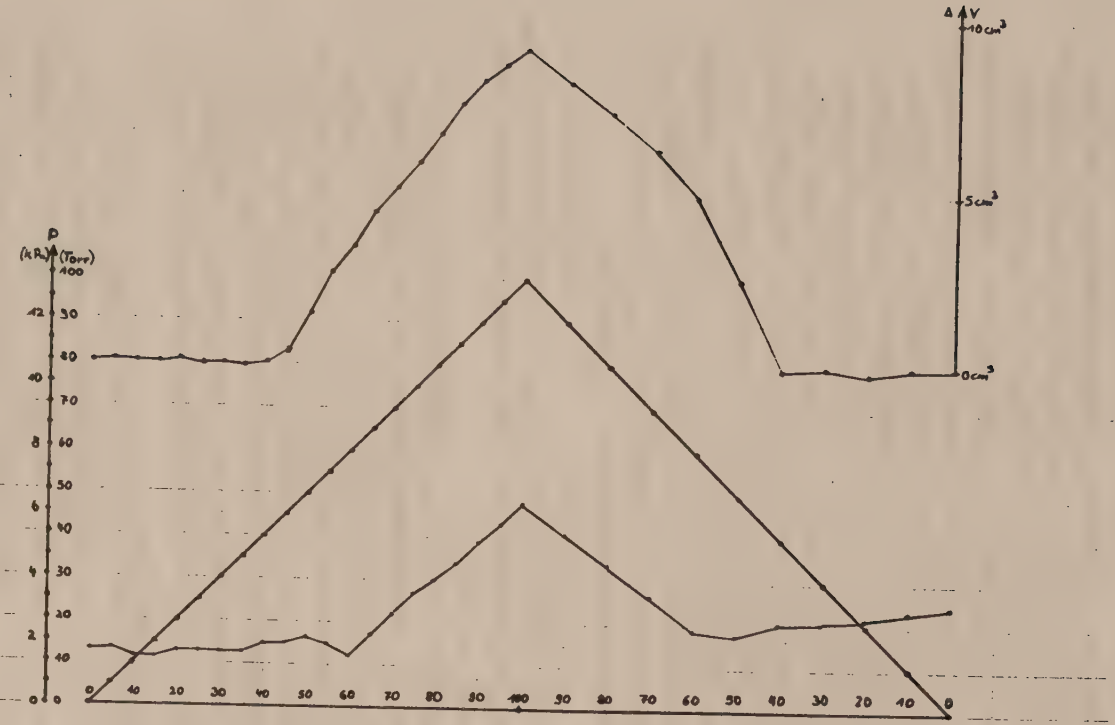


Abb. 2b: Blutige Venendruckmessung mit Strumpf III - untere Kurve: Druck in der dorsalen Großzehenvene (das hohe Grunddruckniveau ist durch die Stauwirkung des Strumpfes bedingt und läßt sich durch Aufschneiden des Strumpfes am Fuß beliebig senken) mittlere Kurve: Staumanschettendruck obere Kurve: Fesselvolumen (korr.)

Das Diagramm 2a zeigt, daß der blutig gemessene Venendruck nach Überwindung des hydrostatischen Druckes der Blutsäule direkt proportional zum Manschettendruck ansteigt. Die Einführung des Strumpfes III in den Versuch (Abb.2b) bewirkte eine Verzögerung des Volumenanstiegs sowie einen höheren Grunddruck in der Großzehenvene, der sich unter Verringerung der Schnürwirkung des Strumpfes durch Aufschneiden des punktionsstellennahen Strumpfteils beliebig senken ließ. Für Staudrucke oberhalb 60 Torr (8 kPa) stimmte der Verlauf der Venendruckkurve mit dem aus Abb.2a überein, so daß auch hier die gleiche Proportionalität gegeben war.
Dies läßt in erster Näherung eine Beziehung zwischen dem Venendruck P_V und dem Staumanschettendruck P_{SM} und dem hydrostatischen Druck P_{Hy} bei Verwendung eines Ankopplungsfaktors F_{AK} vermuten:
$P_V = F_{AK} \times P_{SM} - P_{Hy}$. Der durchschnittliche Ankopplungsfaktor (F_{AK} ist als Quotient $P_V : P_{SM}$ im P_{SM}-P_V-Diagramm mit dem Betrag der Steigung identisch) beträgt 0,77 .
Nimmt man nun an, daß die Beziehung auch bis zur Höhe des systolischen Blutdrucks Gültigkeit besitzt und der Druckverlust proportional bleibt, so läßt sich der Ankopplungsfaktor als Quotient aus dem tatsächlichen systolischen Blutdruck am Oberarm (mit genügend breiter Manschette gemessen) P_{RR} und dem am Oberschenkel mit der Staumanschette gemessenen Druck P_{SM} bei flacher Lagerung (P_{Hy}= 0) bestimmen:
$F_{AK} = P_{RR} : P_{SM}$.
Bei der Versuchsperson ergab die Messung mit der Doppler-Ultraschall-Sonde einen systolischen Blutdruck P_{RR}=115 Torr und P_{SM}=145 Torr. Der sich daraus ergebende Ankopplungsfaktor $F_{AK}= P_{RR}:P_{SM}$=0,79 unter-

scheidet sich vom blutig gemessenen Ankopplungsfaktor nur um 0,02 .

Nach Abzug der hydrostatischen Druckkomponente (Tab.2) bestätigt der Versuch die Empfehlung von Bethge, Caleya und Barbey(15), den Staudruck in der Tiefe P_{St} durch einen Ankopplungsfaktor F_{AK} zu teilen, um den erforderlichen Staumanschettendruck P_M zu erhalten: $P_M = P_{St} : F_{AK}$. Der Ankopplungsfaktor F_{AK} wird prinzipiell ähnlich als Quotient erhalten aus dem nach Riva-Rocci ermittelten systolischen Blutdruck im Oberarm P_{RR} und dem Druck in der Staumanschette P_{SM} ,bei dem mit Durchströmung der Arterie erste Pulsationen und eine Volumenzunahme plethysmographisch feststellbar sind: $F_{AK} = P_{RR} : P_{SM}$.

Druck im der Staumanschette	100 Torr
Multipliziert mit dem Ankopplungsfaktor 0,77 = Druck in der Vena femoralis	77 Torr
Gemessener Druck in der Großzehenvene	- 43,6Torr
Hydrostatischer Druck (vorwiegend)	33,4Torr
Dieser hydrostatische Druck entspricht bei einer Dichte des Blutes von 1,06 g/cm^3	42,83 cm Blutsäule
Abgezogen von der Höhe der Meßstelle des blutigen Venendrucks von 71 cm über der Liege	28,17 cm

Die Höhe von 28 cm liegt im Bereich der Staumanschette

Tab. 2 : Bsp. einer Kontrollrechnung

3.2 Venendruckfortpflanzung

Fraglich war, ob sich zusätzlich zum hydrostatischen Druckverlust P_{Hy} noch ein hydraulischer Faktor meßbar addiert, beispielsweise für das fließende System durch Einengung der Venen unter Strümpfen der Faktor r^4 nach dem Hagen-Poiseuilleschen Gesetz(19). Zu prüfen war also, wie die Staumanschetten-Venendruck-Volumen-Relation durch äußere Kompression beeinflußt werden kann, welcher Druck effektiv am Ort der Volumenmessung anzunehmen ist und wodurch eine plethysmographische Strumpfdruckmessung begrenzt werden könnte.

Dazu wurde bei gleicher Versuchsanordnung (Kap. 3.1) zusätzlich am Unterschenkel eine 30 cm breite allseits gleichmäßig komprimierende Druckmanschette aus weichem Plastikmaterial angelegt und bei einem Oberschenkelstaudruck von 0 Torr stufenweise nach Einstellen des Gleichgewichts von 0 bis 50 Torr (6,7 kPa) aufgepumpt und wieder abgelassen (Abb. 3 a); bei einem Oberschenkelstaudruck von 50 Torr (6,7 kPa) wurde der Unterschenkelmanschettendruck stufenweise von 40 Torr (5,3 kPa) auf 0 Torr und bei einem Oberschenkelstaudruck von 60 Torr (8,0 kPa) der Unterschenkelmanschettendruck stufenweise von 0 auf 50 Torr (6,7 kPa) eingestellt (Abb. 3b); zusätzlich wurde bei konstantem Unterschenkelmanschettendruck von 40 Torr (5,3 kPa) der Oberschenkelstaudruck in 10 Torr(1,3 kPa)-Stufen von 0 bis 90 Torr (12 kPa) gehoben und wieder auf 0 Torr gesenkt (Abb. 3c); in allen Fällen wurde das Verhalten des Druckes in der dorsalen Großzehenvene verfolgt.

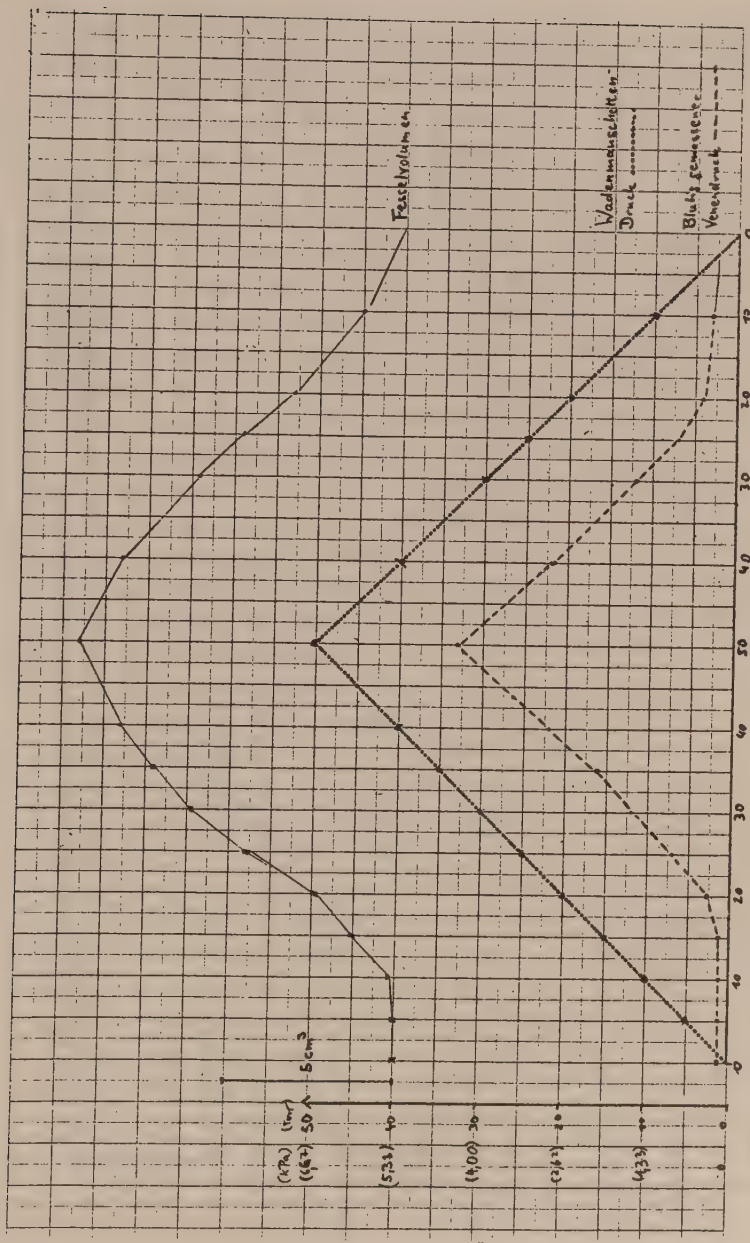


Abb. 3 a: Druck in der dorsalen Großzehenvene (untere Kurve) in Abhängigkeit vom Druck in der 30 cm breiten Unterschenkelmanschette ------(mittlere Kurve), obere Kurve: Fesselvolumen (nullpunktskorrigiert)

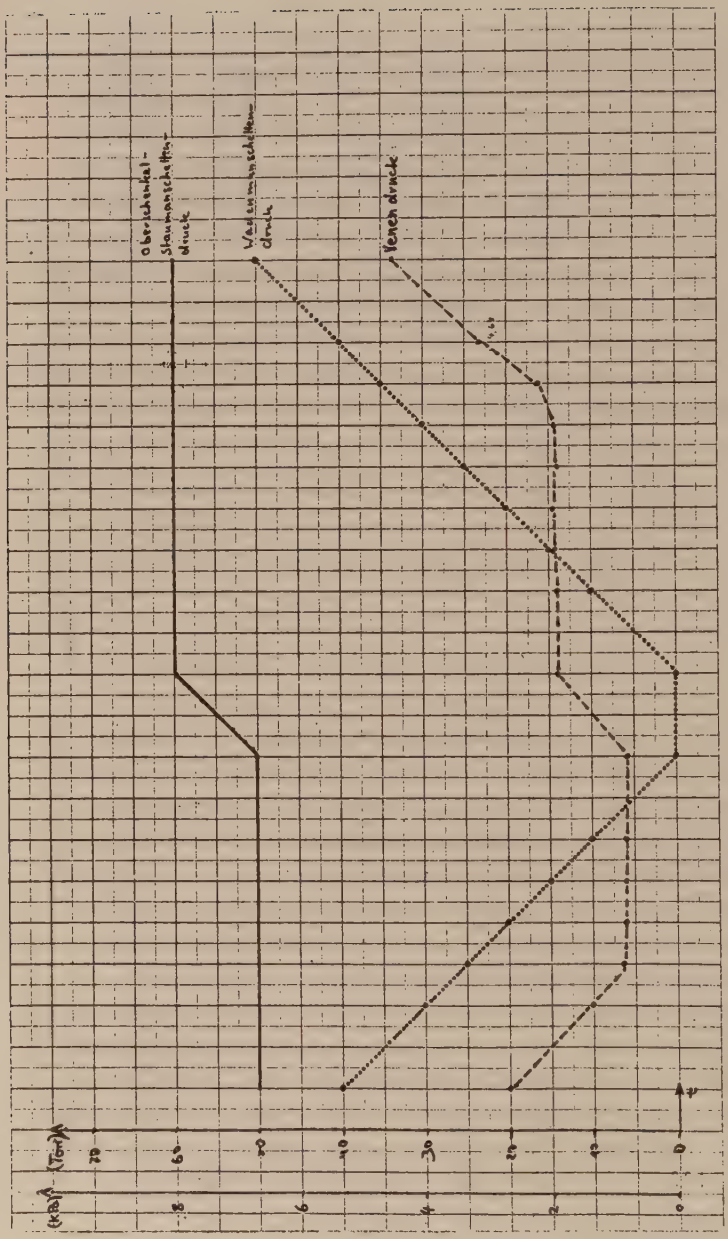


Abb. 3 b: Druck in der dorsalen Großzehenvene ——(untere Kurve) in Abhängigkeit vom Druck in der Unterschenkelstaumanschette ..... und vom Druck in der Oberschenkelstaumanschette —— (obere Kurve).

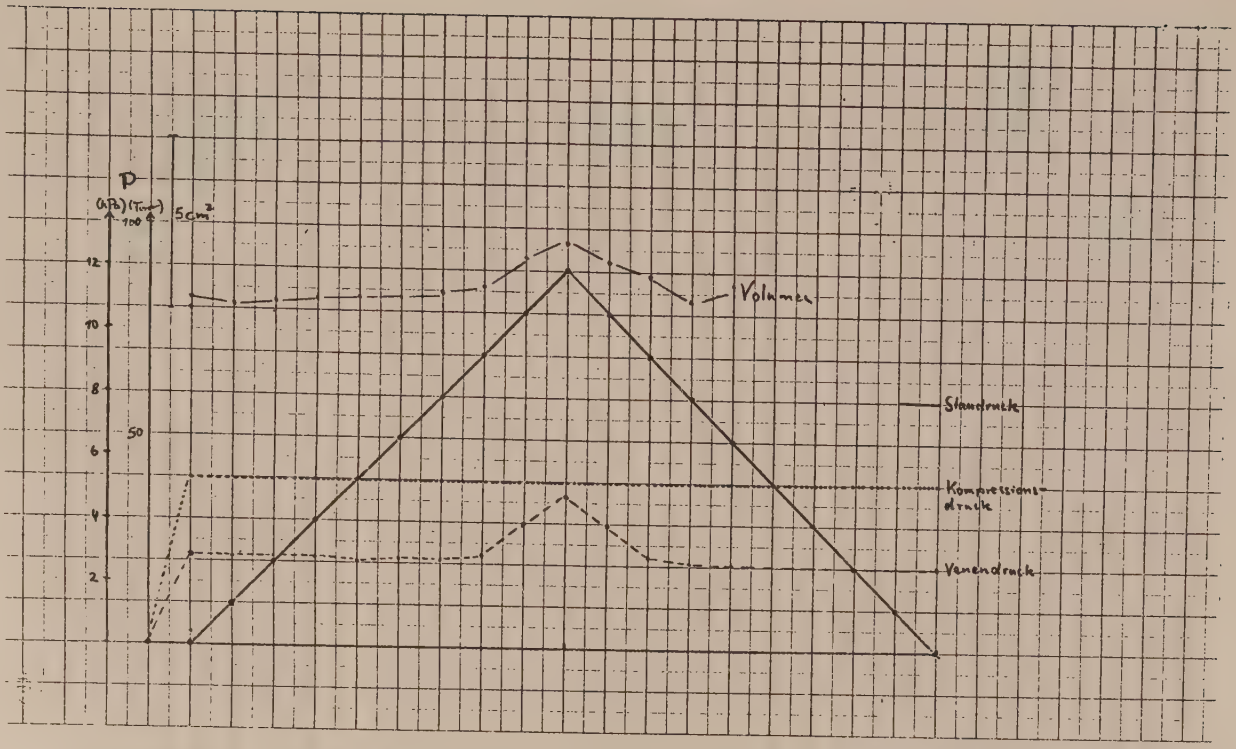


Abb. 3c: Druck in der dorsalen Großzehenvene ---(untere Kurve) in Abhängigkeit vom Druck ——— in der Oberschenkelstaumanschette bei gleichzeitiger Unterschenkelmanschettenkompression von 40 Torr(5,3kPa) ..... .—·—Fesselvolumen.

Der Einsatz der 30cm breiten Unterschenkelmanschette zeigte, daß der venöse Druck dem Manschettendrck im Abstand von 19 Torr ≙ 2,53 kPa ≙ 26,8 cm WS folgt (Abb. 3a,b,c). Der Ankopplungsfaktor ergibt sich als 1,0. Dies entspricht den Untersuchungen für den arteriellen Blutdruck, wonach bei Verwendung von 30 cm breiten Manschetten auf einen Korrekturfaktor verzichtet werden kann(34). Auch liegt die Annahme nahe, daß die Fortpflanzung des Druckes von außen bei den allseitig gleichmäßig andrückenden Manschetten auf die tiefen Gefäße ohne wesentliche Druckverminderung abläuft.[x] Der in der Großzehenvene blutig gemessene Druck beginnt also mit einer Verzögerung von ca. 19 Torr (2,53 kPa) parallel zum Manschettendruck anzusteigen und ebenso im gleichen Abstand wieder abzufallen. Diese 19 Torr (2,53 kPa) können wiederum (Tab.1) allein durch den hydrostatischen Druck der Blutsäule bedingt sein: Addiert man zu dem blutig gemessenen Druck die 19 Torr (2,53 kPa) hydrostatischer Druck der ungefähr 25 cm hohen Blutsäule zwischen dem distalen Bereich der Unterschenkelmanschette und der Punktionsstelle, so erhält man den Druck an der effektiven Staustelle der Unterschenkelmanschette. Als effektive Staustelle darf bei

[x] Die direkte Folgerung, daß der Strumpfandruck sich ebenso fortsetzt,ist jedoch nicht zulässig, da dieser Andruck durch zirkuläre Spannung entsteht und damit krümmungsradiusabhängig ist(57,71,77). So kann der auf Flächen mit kleinem Radius wirkende hohe Druck (z.B. an der Schienbeinkante, Abb.5) auf das zwischen Tibia und Fibula befindliche Gewebe nur eingeschränkt wirken, sodaß mehr der geringere Druck von Flächen mit großem Radius zur Geltung kommt. In der Summe muß also ein Druckverlust resultieren.

Hochlagerung des Beines der distale Bereich der Unterschenkelmanschette angenommen werden, da unter dem proximalen Teil durch den hydrostatischen Druck der Blutsäule relativ höhere intravenöse Drucke zu erwarten sind, während der Manschettendruck überall gleich ist. Übersteigt nun der Druck von außen auf die Gefäßwand gegeben durch den scheinbar unvermindert durch das Gewebe dringenden Druck der breiten Manschette(34) den Gefäßinnendruck, kommt es zu einer Einengung des Lumens und einem Aufstauen des distalen Blutes.

Im ersten Teil der Abb.3b verhält sich der Druck in der Großzehenvene trotz Vorstauung mit 50 Torr (6,67 kPa) Oberschenkelstaumanschettendruck wie im zweiten Teil der Abb.3a: Der Druck in der Großzehenvene wird zunächst durch den Staudruck in der Unterschenkelmanschette bestimmt. Bei 25 Torr (3,33 kPa) und weniger wird der blutig gemessene Druck durch den Oberschenkelstaudruck konstant gehalten und entspricht mit 6,5 Torr (0,87 kPa) dem bei 50 Torr (6,67 kPa) ohne Unterschenkelmanschette zu messenden Wert von 8 Torr (1,06 kPa) nach Abb. 2a. Entsprechendes gilt für den zweiten Teil der Kurve (Abb.3b): Zunächst wird der Druck in der Großzehenvene (18 Torr ≙ 2,4 kPa) nur durch die Oberschenkelkompression (60 Torr ≙ 8,0 kPa) hervorgerufen (nach Abb.2a ergaben sich für 60 Torr (8,0 kPa) Oberschenkelmanschettendruck 16 Torr (2,1 kPa) Zehendruck). Bei ca. 33 Torr (4,4 kPa) Wadenmanschettendruck überschreitet der gebildete Großzehendruck den durch die Oberschenkelstauung hervorgerufenen Druck von 18 Torr (2,4 kPa); der Unterschenkelmanschettendruck wird bestimmend; die Druckkurve folgt wieder der in Abb.3a.

Hält man den Unterschenkelmanschettendruck konstant auf 40 Torr (5,3 kPa) und variiert den Oberschenkelmanschettendruck (Abb.3c), so ist der blutig gemessene Druck wie in Abb.3a 22 Torr (2,9 kPa), d.h. nur der Unterschenkelmanschettendruck ist bestimmend. Nach Abb. 2a,b würde bei 70 Torr (9,3 kPa) Oberschenkelmanschettendruck der Druck in der Großzehenvene größer als 22 Torr (2,9 kPa) und damit für den Druckverlauf im venösen System an der Punktionsstelle maßgeblich: Die Druckkurve für Oberschenkelstaudrücke zwischen 70 und 90 Torr (9,3 und 12,0 kPa) entspricht der in Abb. 2a,b .

Eine Beeinflussung oder gar eine Summation der Staudruckwirkungen scheint nicht stattzufinden. Meßbar ist jeweils nur der aus einer einzelnen Staumaßnahme hervorgehende höchste Einzeldruck. Eine Druckfortpflanzungsänderung durch eine etwaige langsame Einengung des venösen Abflusses ist nicht meßbar (Abb. 3b).

Übertragen auf Strümpfe läßt sich sagen, daß bei dieser Methode der Strumpfandruck die Druckfortleitung zwischen dem Ort der Messung und dem Ort der Stauung nicht stört,sofern er nicht den Gefäßinnendruck der Venen überschreitet.

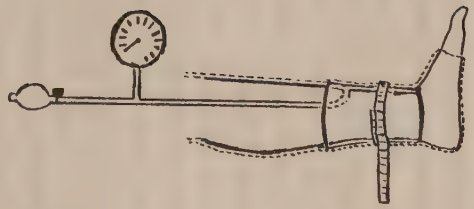
Der Gefäßinnendruck zwischen der Stau- und Volumenmeßstelle wird für den kritischen Staudruck im Bereich des Kurvenknickpunktes der Druck-Volumen-Meßkurve im wesentlichen bestimmt durch den Strumpfandruck an der Volumenmeßstelle + den Volumenmeßmanschettendruck x Ankopplungsfaktor + den hydrostatischen Druck der Blutsäule zwischen Volumenmeßstelle und Druckstelle des Strumpfes. Mit anderen Worten: Ist die Strumpfandruckwirkung auf die abfließenden Venen proximal von der Meßstelle höher als der hydro-

statische Druck der distalen Blutsäule und der Strumpfandruck und der Druck der Volumenmeßmanschette multipliziert mit dem Ankopplungsfaktor zusammen, so ist eine Verfälschung der Andruckmessung in Richtung zu hoher Werte zu erwarten.
Aus dieser Formel läßt sich für Strümpfe mit falschem oder ungünstigem Druckgefälle folgern für
die Komponente "hydrostatischer Druck":
Je höher das Bein gelagert und je weiter proximal die Schnürstelle des Strumpfes liegt, desto unwahrscheinlicher ist eine Störung.
die Komponente "Strumpfandruck":
Stellen hohen Strumpfandrucks sind unkomplizierter zu messen.
den Faktor "Volumenmeßmanschettendruck":
Ein starker Andruck und eine größere Breite (der Ankopplungsfaktor geht gegen 1) der Volumenmeßmanschette kann sich günstig auf die Andruckmessung auswirken.

3.3 Druckfortpflanzung Strumpf - tiefe Beinvene

Es wäre natürlich wünschenswert, auch den effektiven äußeren Strumpfandruck zu kennen, um dadurch bei hinreichendem Wissen über den Druckabfall im Gewebe das oben beschriebene doch relativ zeitraubende und nicht jedem zugängliche Verfahren umgehen zu können. Auch möchte man Einflüsse, wie sie beispielsweise durch schlafferes oder strafferes Anziehen der Strümpfe entstehen, erkennen und die Andruckstendenz rasch abschätzen können, die als scheinbare Fehler in die Strumpfwirkungsmessung eingehen (Kap.5). Da die meisten Verfahren zur äußeren Andruckmessung sehr aufwendig sind oder nicht die gewünschten Werte liefern(1,78), wurde ein Verfahren angestrebt, das möglichst die Verhältnisse der Druck-Volumen-Messung nachahmt und unter Ausschaltung der Druckübertragungsverhältnisse durch Gewebe und venöses System arbeitet.

Zu diesem Zweck wurde eine einfache Meßanordnung (Abb. 4a) verwendet, die überall in der ärztlichen Praxis zusammenstellbar ist. Verwendet wurde der Blasebalg eines Blutdruckmeßgerätes; das ebenfalls am Blutdruckmeßgerät befindliche Membranmanometer ist für den Bereich von 0 bis 30 Torr (4 kPa) zu eichen. Unter dem Strumpf plaziert man eine 16 cm breite wie eine doppelwandige Röhre geformte Manschette aus weicher undehnbarer Plastikfolie (Verwendbar ist auch ein von Fa. Gödecke AG, Berlin zur Versandpolsterung von Mustern eingesetztes Kissen gleicher Breite, das eine Strumpfdehnung bis 37 cm Umfang ohne elastische Dehnung der Manschette zuläßt). Talkumpuder verringert die Reibung zwischen Manschette und Strumpf. Ein einfaches in einer Masche eingehängtes Maßband liefert



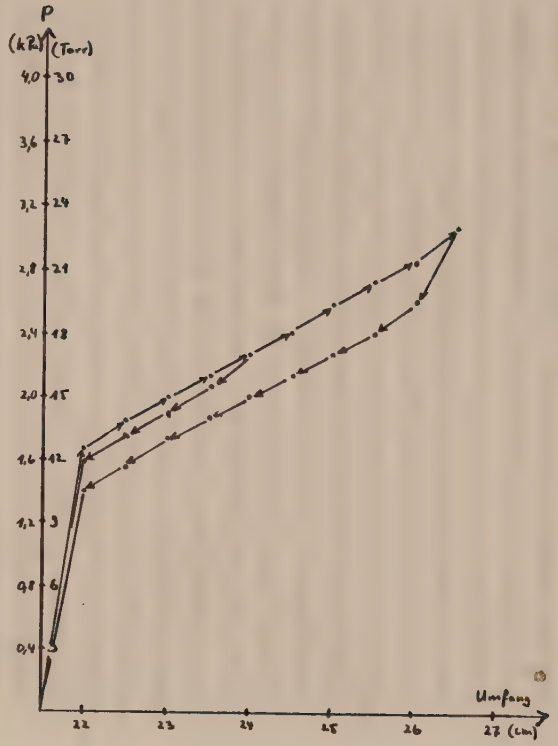


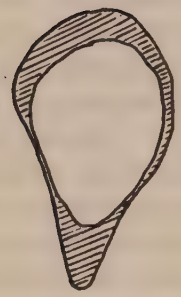
Abb. 4a(oben): Versuchsanordnung zur äußeren Strumpfandruckmessung:Blasebalg,Manometer,Manschette,▥▥▥Maßband,-----Strumpf

Abb 4b(rechts): Druck-Umfang-Diagramm,Fessel, Strumpf III. Die Einschlußkurve zeigt die Hysterese des Strumpfes bei der geringeren Dehnung auf 24cm.

die Umfangswerte. Man kann sich nun durch Aufpumpen und Ablassen der Manschette Druck-Umfang-Diagramme herstellen. Abb.4b zeigt eine derartige Druck-Umfang-Kurve. Der Druck in der Manschette wurde jeweils nach 0,5 cm Umfangsänderung abgelesen.
Die ersichtliche Hysterese ist nicht allein strumpfbedingt; sie entsteht auch durch Reibung zwischen Strumpfgewebe und Manschette, d.h. beim Aufpumpen erhält man zu hohe Druckwerte, beim Ablassen zu niedrige. Der wahre Andruck für den abgelesenen Umfang liegt dazwischen (durch Kneten des Strumpfes(75) über der Manschette steigt bzw. fällt der Druck bei gleichem Umfang auf einen Wert, der innerhalb der Hystereseschleife liegt). Fehler bedingt durch Randeffekte wie z.B. bei kleinen Blasen und Sonden(1) fallen auf Grund der großen Oberfläche der Manschette nicht ins Gewicht. Da die Manschette innerhalb der 0,5 cm Umfangszunahme Zylinderform annimmt (steiler initialer Anstieg der Kurve), werden Unterschiede der Krümmungsradien des Beines oder eines der Formgebung dienenden Modells ausgeglichen und es kann vom Umfang auf das Volumen geschlossen werden.
Exemplarisch (dieses Verfahren soll mit empfindlicherer Spezialmanschette an weiteren Strumpfsorten und auf verschiedene Arten angezogene Strümpfe angewandt werden(17)) wurde die äußere und die plethysmographische Druckmessung mit Strumpf III vorgenommen. Die plethysmographische Messung ergab für diesen Strumpf 11 Torr x 0,77 = 8,5 Torr (1,1 kPa) Andruckwirkung. Aus Abb.4b ist für den Fesselumfang der Testperson von 22,5 cm ein äußerer Strumpfandruck bei gleichmäßigem Krümmungsradius zwischen 11,5 und 14,0 Torr (1,5 u. 1,8 kPa) zu entnehmen. Obwohl sicherlich die Temperaturabhängigkeit (gemessen wurde bei

24°C) und die Feuchtigkeitsabhängigkeit (in geringerem Maße) der zirkulären Spannung und Einflüsse des unterschiedlichen Längszuges (die durch Aufziehen auf ein Beinmodell möglichst ausgeschlossen wurden) nicht zu vernachlässigen sind, muß dennoch der Druckverlust, der bis zu einem Drittel des äußerlich anzunehmenden Druckes ausmacht, eine weitere statisch-anatomisch bedingte Ursache haben. Vorstellbar ist, daß der krümmungsradiusabhängig(55,75) höhere Strumpfandruck über vorspringenden knochen- und sehnenunterstützten Gewebsteilen durch die darunterliegende Tibia und Fibula und wahrscheinlich auch der Achillessehne (wegen der fixierten Ferse) abgefangen wird (Abb.5a,b). Es kommt also nur der geringere Druck auf Flächen mit dem grösseren Krümmungsradius zum Tragen; die Folge ist ein Druckverlust. Ähnlich wie bei breiten Manschetten muß mit einem Ausweichen des Druckes von Stellen höheren Andrucks nach der Seite zum Ort niedrigeren Andrucks gerechnet werden. Nur dort, wo über größere Flächen derselbe Andruck des Strumpfes herrscht, können die Verhältnisse bei breiten Manschetten Anwendung finden (34), weshalb an der Wade günstigere Druckfortpflanzungsverhältnisse zu erwarten sind [x].

[x] Da also der zumeist über zirkuläre Spannungsmessungen gewonnene Strumpfandruck(40) nicht mit dem allseitig gleichmäßigen Manschettendruck in der Wirkung gleichzusetzen ist, sind Strömungsmessungen unter Manschettendruck(3,4,54,57,72) nur bedingt auf Strümpfe "gleichen Andrucks" übertragbar.



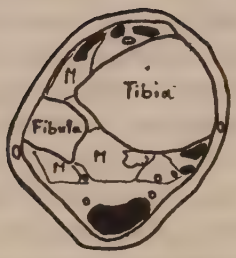


Abb. 5a: Druckprofil an der Fessel, ausgeübt von einem Kompressionsstrumpf. Die Breite der schraffierten Fläche senkrecht zur Oberfläche des Fesselquerschnitts gibt die relative Druckverteilung an. Gezeichnet nach (22).

Abb. 5b(rechts): Querschnitt einer Fessel
●=Sehnen, o =Venen, M =Muskel Gezeichnet nach (62).

3.4 Strumpf- und Gewebshysterese

Bei der Druck-Volumen-Schreibung kann man die Strumpfdruckwirkung grundsätzlich mit zunehmendem und abnehmendem Staudruck bestimmen (Abb.1). Von großem Interesse dabei ist, wie sich die Strumpfhysterese(14, 55,75,78) und die Gewebshysterese bei der stufenweisen Druck-Volumen-Schreibung auswirken.

Um einen Eindruck von der Größenordnung der unterschiedlichen Einflüsse für den zunehmenden und den abnehmenden Staudruck zu gewinnen, wurde bei vorgegebener Lagerung (Kap.3.1) in 5 Torr-Stufen (1,67 kPa, gemessen mit Hg-Manometer) gestaut und nach einer deutlichen Volumenzunahme (ca. 10 cm^3) wieder in 5 Torr-Stufen der Staudruck gesenkt. Das an der Wade gemessene Volumen wurde sowohl mit einem Luftsegmentplethysmographen (Vasoscript) als auch mit einem "Strain-gauge-Plethysmographen" (Periquant) aufgezeichnet. Zur Untersuchung der Strumpfhysterese diente ein durchschnittlicher(18) Thromboseprophylaxestrumpf (II).

Das Ergebnis, wie es Abb. 6a u.b wiedergibt, zeigt, daß die Knickpunkte wie bei den Messungen ohne Strumpf bei "Periquant" und "Vasoscript" bei ca. 21 Torr (2,8 kPa liegen. Der Knickpunkt mit Strumpf II ist bei der "Periquant-Messung" (Abb.6a) nur undeutlich bei nicht parallelem Kurvenverlauf in Richtung 25 Torr (3,3 kPa) verschoben. Die "Vasoscript-Messung" (Abb.6b) weist bei parallelem Kurvenverlauf einen Knickpunktwert von ca. 27 Torr (3,6 kPa) auf. Beide Geräte zeigen nach Aufheben der Stauung einen deutlichen Volumenschwund auf.

Dieser praktisch über den ganzen Versuch fortgesetzte Volumenschwund dürfte trotz längerer vorhergehender

Hochlagerung des Beines auf die weitere Ödemausschwemmung(31,32) zurückzuführen sein. Auch die Stauung, die an der Volumenmeßstelle einen Gefäßüberdruck bis 20 Torr (2,7 kPa) ausbildet und damit diesen Prozeß der Ödemausschwemmung während der noch erheblichen Stauzeit(53) umkehren oder zumindest aufhalten könnte(66), scheint keine Auswirkungen zu haben; die Tendenz zum Volumenschwund ist bei gleicher Stauung auch im abfallenden Schenkel der Druck-Volumen-Kurve fortgesetzt. Bei der Ödemausschwemmung unter der Manschette handelt es sich um einen hinreichend konstanten Vorgang(31,32). Deshalb erscheint es zulässig, die eigentlichen Kurvenknickpunkte als Schnittpunkte der Geraden zu ermitteln, die zum einen durch Verbinden der Meßpunkte ohne Stauwirkung und zum anderen der Punkte mit Stauwirkung entstehen. Auch bei einer derartigen Auswertung ist ein deutlicher Unterschied der Druckkoordinaten des extrapolierten Kurvenknickpunktes nicht festzustellen.

Da die elastischen Elemente sämtlicher Kompressionsstrümpfe Hystereseeigenschaften besitzen(14,55,75,78), erstaunt es zunächst, daß auch mit Strumpf kein deutlich unterschiedlicher Knickpunktdruck zwischen zunehmenden und abnehmenden Staudrucken gesehen werden kann. Es ist aber zu bedenken, daß bei einer normalen Strumpfmessung eine Volumenzunahme von maximal 5 cm^3 (5 cm^3 Volumenzunahme reichen für ca. 5 Meßpunkte nach Staudruckwirkung bei 5 Torr Stufen (Abb.2a,b)) entsprechend einer Umfangzunahme von 3 mm bei der Versuchsperson stattfindet. Die Manschettendruckkurve für einen durchschnittlichen(18) Thromboseprophylaxestrumpf (ungefähr der Kompressionsklasse I entsprechend) gibt nach Abb.4b für die

zugehörige Umfangszunahme von 22,5 auf 22,8 cm eine Druckdifferenz von 0,8 Torr (0,1 kPa). Die Hysterese ist für kleinere Dehnungen ebenfalls verringert(14, 75) und liegt in derselben Größenordnung, wie auch die Innenkurve in Abb.4b zeigt. Die darin noch enthaltene durch die Reibung im Strumpfgestrick entstandene Hysterese wird wegen der Pulsation des Beines zumindest verringert. Diese Pulsation wurde mit "Vasoscript" von der Fessel mit 0,1 cm^3 (Originalaufzeichnung Abb.11) zur Wade zunehmend registriert. Man kann also insgesamt sagen, daß der Hystereseeinfluß bei Strümpfen niedriger Kompression ausgesprochen gering ist. Sämtliche Messungen, bei denen ein Strumpf mit aufsteigenden und absteigenden Druckstufen plethysmographisch aufgenommen wurde, ergaben deshalb keinen deutlichen Unterschied, so daß es gleichgültig erscheint, ob man bei Strümpfen niedriger Kompression mit zu- oder abnehmendem Staudruck arbeitet.

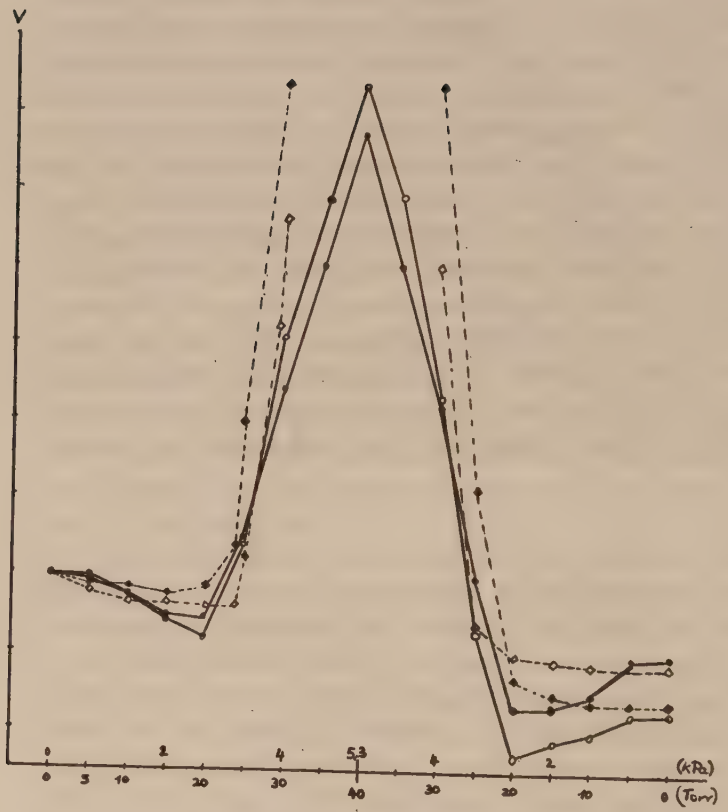


Abb. 6a: Druck-Volumen-Diagramm, aufgenommen mit Periquant
——— = ohne Strumpf
– – – – = mit Strumpf II

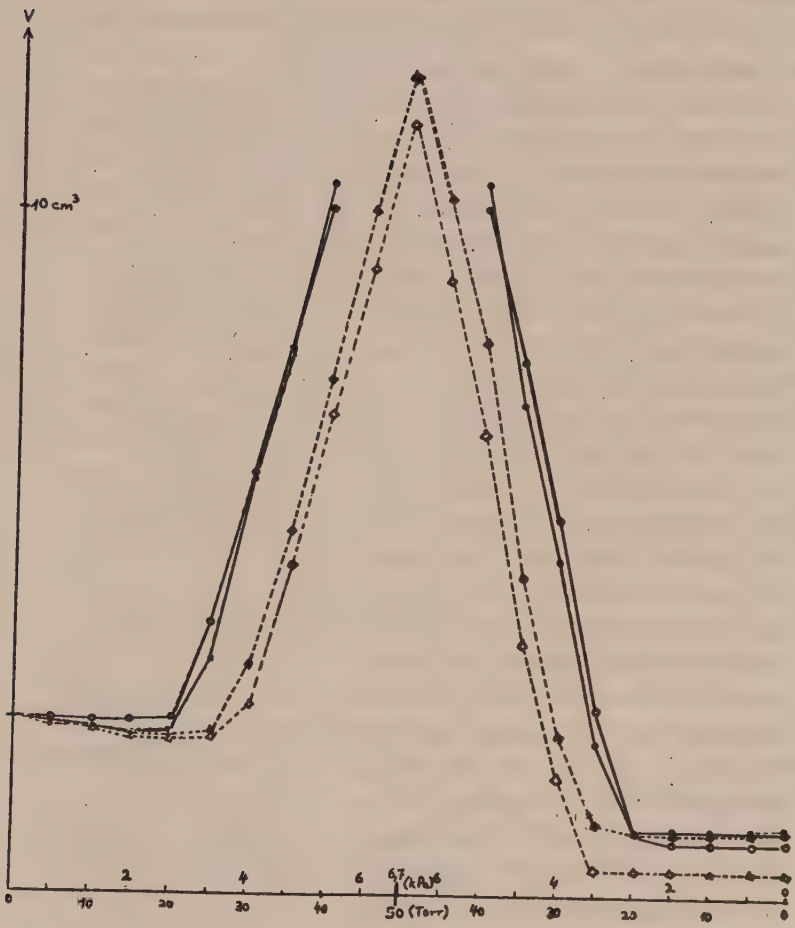


Abb. 6b: Druck-Volumen-Diagramm, aufgenommen mit Vasoscript
——— = ohne Strumpf
------- = mit Strumpf II

3.5 Volumenmeßgeräte

3.5.1 Vergleich im Druck-Volumen-Versuch

Schon der unterschiedliche Verlauf der Meßkurven bei zwei verschiedenen Plethysmographen im vorhergehenden Kapitel wirft die Frage auf, welcher dieser beiden in der Praxis häufig verwendeten Geräte sich für die Bestimmung des Andruckpunktes am besten eignet. Wirkt sich der Andruck von ca. 12 Torr (1,6 kPa) der Luftsegmentplethysmographenmanschette nicht ungünstig aus, auch wenn sich dieser bei der Bestimmung der Andruckwirkung von Strümpfen nach Subtraktion der Knickpunktswerte ohne von den Werten mit Strumpf wieder größtenteils eliminiert? Liefert nicht ein leichteres mit Quecksilberdehnungsmeßstreifen arbeitendes Gerät gleich gute oder gar bessere Resultate?

Um auszuschließen, daß es sich bei den Differenzen der Druck-Volumen-Kurven (Abb.6) um Zufallserscheinungen handelt, wurde der Versuch aus Kap. 3.4 unter identischen Bedingungen wiederholt und weitere vier Messungen an Versuchsperson B durchgeführt, zwei Messungen mit Strumpf II. Mit weiteren "Vasoscript-Versuchen" nur mit ansteigendem Druck wurde mit anderen "Bettstrümpfen" die Parallelität des Anstiegs mit und ohne Strumpf überprüft und bestätigt. Vier weitere Messungen wurden simultan mit "Vasoscript" und "Periquant" an der Wade bei gleich hoher Lagerung aufgezeichnet; bei zwei dieser Messungen war die Manschette des Luftsegmentplethysmographen "Vasoscript" proximal an der Wade befestigt, der Meßfühler des Gerätes "Periquant" unmittelbar distal daneben; bei zwei Messungen waren die Meßfühler vertauscht, "Periquant" proximal und "Vasoscript" distal.

Auch an den nochmals unter identischen Verhältnissen mit "Periquant" aufgezeichneten Kurven fällt wie in Abb.6a auf, daß die Kurve mit Strumpf erheblich steiler ansteigt. Eine deutliche Knickbildung zeichnet sich insbesondere bei den Meßkurven mit Strumpf nicht ab. Eine etwaige Auswertung auf die venöse Druckänderung durch den Strumpf ergäbe den unbrauchbaren Wert von ca. 1 Torr (0,13 kPa).
Der steilere Verlauf der Kurven mit Strumpf läßt sich vielleicht damit erklären, daß sich bei dem geringeren Andruck des "Periquant"-Meßfühlers (dieser Druck ist leider nicht ablesbar: es werden 3-6 Torr(0,4-0,8kPa)angegeben (12,41,42); beim "Vasoscript" ca. 12 Torr (1,6 kPa), einstellbar mit Manometer(10)) eine gleiche Entleerung des Beines unter der Manschette wie mit Strumpf auch durch Hochlagerung wegen des zu geringen Gefälles der durchhängenden Wade nicht hat erreichen lassen. Wie die analog geschriebene Kurve des Luftsegmentplethysmographen (Abb.6b) zeigt, würde ein höherer Andruck der Manschette gleiche venöse Ausgangsverhältnisse mit und ohne Strumpf, d.h. weitgehend gleich ausgepresste Venen erzeugen und damit auch einen parallelen Anstieg der Kurven mit und ohne Kompressionsstrumpf. Jedoch läßt sich mit "Periquant" eine Tonusreaktion und damit Volumenabnahme (Abb.6a) als überschießende Muskelreaktion nachweisen, die im Bereich eines transmuralen Drucks von 8 Torr (1,1 kPa) ein Maximum besitzt(37).
Wie wichtig der deutliche Übergang der Venen vom entleerten Zustand mit Minimallumen zum auf der ganzen Länge bis zur Meßstelle entfalteten Lumen ist, wird noch mehr in Abb.7 verdeutlicht. Abb.7a gibt eine "Periquant"-Messung an der Wade bei proximal knapp daneben angelegter Luftmeßmanschette wieder. Der Hg-

Abb.7a: Periquant distal

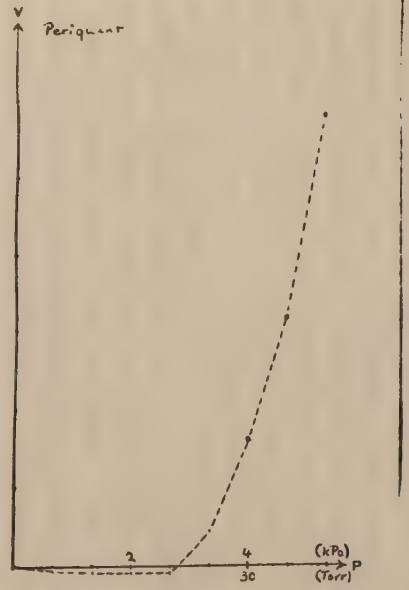


Abb.7b: Vasoscript proximal

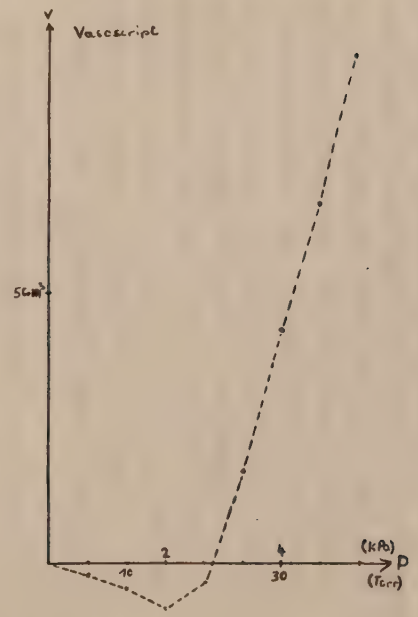


Abb.7: Simultane Aufzeichnung der Druck-Volumen-Kurve mit "Periquant" und "Vasoscript" a u. b: Der "Periquant"-Meßfühler liegt distal, der "Vasoscript"-Fühler proximal um ca. 0,5 cm versetzt an der Wade

Abb.7c: Periquant proximal

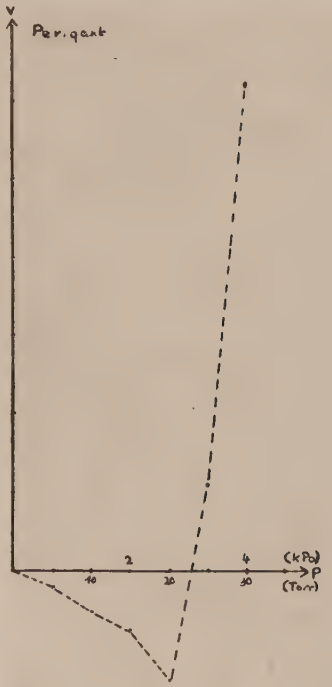


Abb.7d: Vasoscript distal

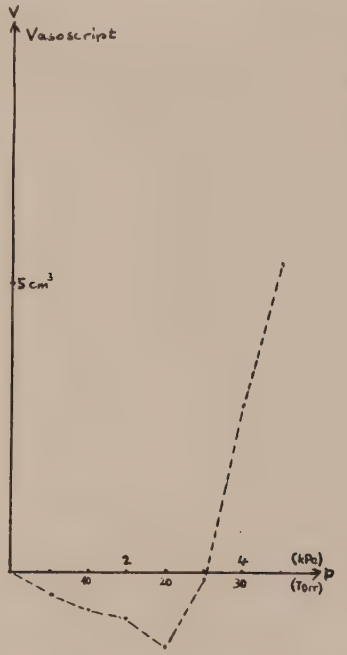


Abb.7: Simultane Aufzeichnung der Druck-Volumen-Kurve mit "Periquant" und "Vasoscript" c u. d: Die Lage der Meßmanschetten wurde ausgetauscht: "Periquant" liegt proximal, "Vasoscript" distal

Meßfühler liegt einerseits höher, dürfte also erst bei höheren Staudrucken einen Volumenanstieg aufzeichnen (hydrostatische Druckdifferenz der Blutsäule zwischen den beiden Meßstellen ‹ 3 Torr ≙ 0,1 kPa). Andererseits drückt der Hg-Meßfühler um ca. 9 Torr (1,2 kPa) weniger als der Luft-Meßfühler an, was als überwiegender Effekt eine Volumenzunahme bei geringeren Drucken bedingen müßte; dies wird jedoch nicht sichtbar. Die "Periquant"-Kurve (Abb. 7a) ist deutlich abgerundet, die "Vasoscript"-Kurve (Abb.7b) setzt sich eher aus zwei geraden Anteilen zusammen. Der in Abb.7b aufgezeigte Volumenschwund wird in Abb.7a nicht deutlich. Vertauscht man nun die Lage der Meßfühler, legt also den Quecksilberdehnungsmeßstreifen proximal an die Wade und die Luftsegmentplethysmographenmeßmanschette distal, so zeigt auch "Periquant" einen abrupten, steilen Anstieg. Die "Periquant"-Kurve 7c entspricht im wesentlichen dem Verlauf der "Vasoscript"-Kurve 7d, ohne daß Effekte des geringeren Andrucks und der tieferen Lage des Hg-Meßfühlers deutlich in Erscheinung treten. Der höheren Lage entsprechend ist der Volumenanstieg in Abb.7d gegenüber 7b verzögert. Die Schnürwirkung der proximal angebrachten Luftsegmentplethysmographenmeßmanschette scheint die "Periquant"-Messung ähnlich wie ein Strumpf mit ungünstigem Druckgefälle zu verfälschen. Schon der normale Andruck des Strumpfes läßt die Verwendung der "Periquant"-Messung zur Strumpfandruckbestimmung nicht mehr zu (Abb.6a). Die Parallelität des Anstiegs der mit "Vasoscript" unter genau gleichen Bedingungen aufgezeichneten Kurve (Abb.6b) läßt gleiche venöse Voraussetzungen bei der Volumenzunahme und der Druckfortpflanzung vermuten, d.h.

voll entfaltete Venen bis zur Meßstelle schon bei der ersten Volumenzunahme, ohne Volumenzunahme jedoch weitgehend entleerte Venen. Der zu schwache Andruck des Dehnungsmeßstreifens bewirkt nicht wie der höhere Andruck der Luftsegmentplethysmographenmeßmanschette, daß bei der ersten Volumenzunahme die venösen Gefäße unter dem Strumpf (noch wichtiger bei Strümpfen mit falschem Druckgefälle) bis zum Volumenmeßfühler vom kollabierten in den entfalteten Zustand übergegangen sind. Dies ist jedoch für eine gute Druckfortleitung zwischen Meß- und Staustelle zu fordern, da es sich um ein fließendes System handelt, für das nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille die Weite des Lumens in der 4.Potenz in das Druckgefälle eingeht. Es bestätigt sich (wie in Kap.3.2 gefordert), daß sich der hohe (und überprüfbare) Andruck der Luftsegmentplethysmographenmeßmanschette eher günstig, der schwächere Andruck des Quecksilberdehnungsmeßstreifens eher ungünstig auf eine exakte, unblutige Venendruckmessung auswirkt und gerade dieser (im allgemeinen wünschenswerte) minimale Auflagedruck eine mögliche Ursache für die Ungenauigkeit des Knickpunktes wird.

Ein sehr wesentlicher Grund für die Unschärfe des Knickpunktes mag auch darin liegen, daß die "Strain-gauge"-Methode Umfangänderungen mißt(79). Der Strumpf drückt auf Flächen mit größerem Krümmungsradius schwächer an, auf ebenen Flächen oder Flächen mit negativem Radius überhaupt nicht(54,69,75). Bei Flächen mit großem Radius ist also wegen des geringeren äußeren Drucks die erste Volumenausdehnung zu erwarten. Aber gerade hier ist bei kleinster Umfangänderung größte Volumenänderung möglich, d,h. die

"Strain-gauge"-Methode kann hier nicht wegen der unterschiedlichen Krümmungsradien des Beines proportional zur Volumenänderung registrieren, während dies mit Luftsegmentplethysmographen eher möglich sein müßte.

3.5.2 Nullinienkonstanz

Beide Geräte sind ursprünglich zur Durchblutungsmessung konstruiert mit einer Dauer im Sekundenbereich und für eine Volumenänderung, die ein Mehrfaches der bei der Andruckmessung vorkommenden beträgt(10,12,38,42).

Zur Überprüfung der Nullinienkonstanz über einen längeren Zeitraum wurden die Meßfühler der beiden Geräte um einen Glaszylinder mit 29 cm Umfang gelegt und die zur Andruckmessung verwendete Empfindlichkeit eingestellt, d.h. beim "Vasoscript" C, beim "Periquant" I. Die Raumtemperatur von 24°C wurde auf +-0,5° konstant gehalten und das Volumen nach 10 Min. Einschaltzeit für 40 Min., nach 50 Min. für 120 Min. registriert. Zusätzlich wurde der Druck auf der inaktiven Seite der Differentialdruckdose des Luftsegmentplethysmographen notiert.

Die Ergebnisse der Prüfung auf Nullinienkonstanz gehen aus Tab.3 und Abb.8a hervor. Beim "Periquant" ließen sich die Angaben von Gutmann und Krötz(42) bestätigen: Das Gerät wies keine Nulliniendrift auf. Beim "Vasoscript" schälte sich eine relativ konstante Drift von ca.-0,035cm^3/Min. heraus. Die Hauptursache für diese Drift sind nicht Undichtheiten oder ähnliches, sondern, wie aus Abb.8b und Tab.3 ersichtlich ist, die proportionale Druckzunahme auf der inaktiven Seite der Differentialdruckdose, hervorgerufen durch deren langsame Erwärmung.

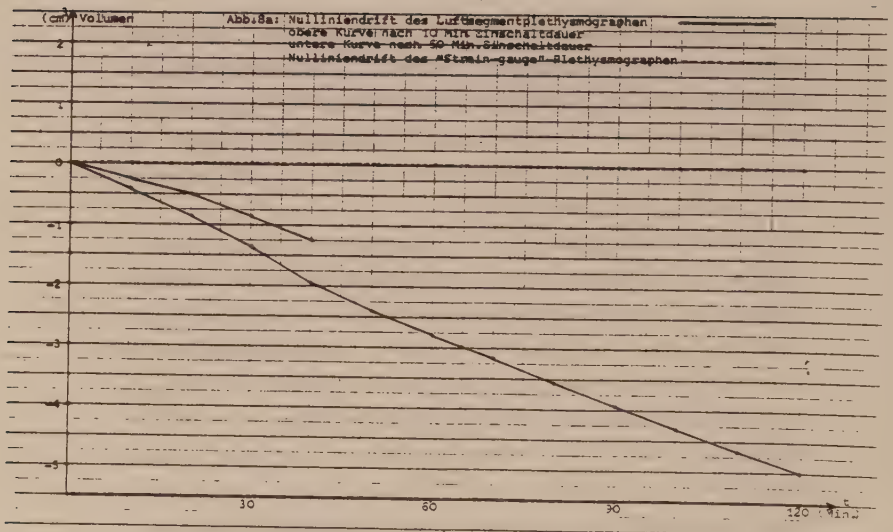


Abb.8a: Nullliniendrift des Luftsegmentplethysmographen
obere Kurve nach 10 Min Einschaltdauer
untere Kurve nach 50 Min. Einschaltdauer
Nullliniendrift des "Strain-gauge"-Plethysmographen

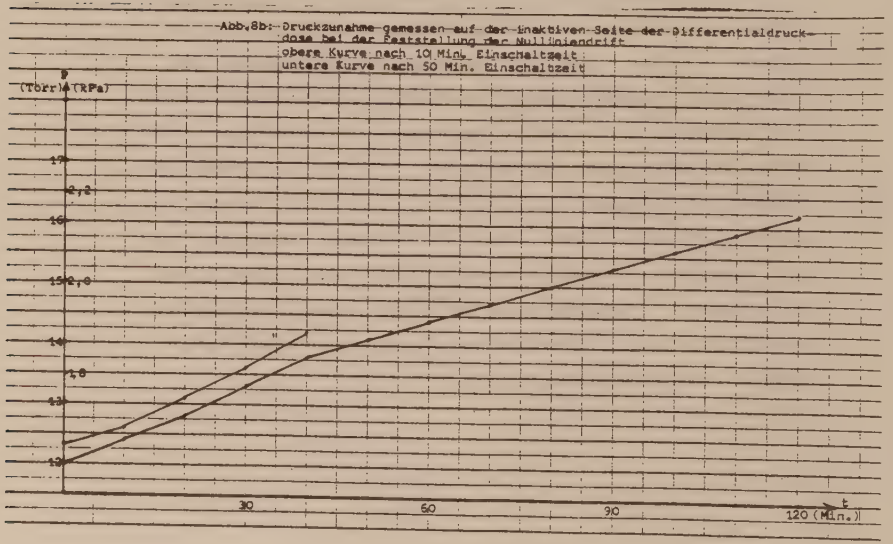


Abb.8b: Druckzunahme gemessen auf der inaktiven Seite der Differentialdruckdose bei der Feststellung der Nullliniendrift
obere Kurve nach 10 Min. Einschaltzeit
untere Kurve nach 50 Min. Einschaltzeit

T a b e l l e 3

Nullinienstabilität des Luftsegmentplethysmographen

Nach 10 Min. Einschaltzeit:

Zeit (Min.)	Volumenabnahme (cm^3)	Volumenabnahme/10 Min. (cm^3)	Druck im Gerät (Torr)	Druckzunahme auf 10 Minuten (Torr)
0	0,0		12,3	
		0,25		0,3
10	0,25		12,6	
		0,25		0,5
20	0,5		13,1	
		0,35		0,5
30	0,85		13,6	
		0,4		0,6
40	1,75		14,2	

Nach 50 Min. Einschaltzeit:

0	0,0		12,0	
		0,4		0,4
10	0,4		12,4	
		0,45		0,4
20	0,85		12,8	
		0,5		0,5
30	1,35		13,3	
		0,4		0,5
40	1,95		13,8	
		0,45		0,3
50	2,4		14,1	
		0,4		0,3
60	2,8		14,4	
		0,35		0,3
70	3,15		14,7	
		0,4		0,3
80	3,55		15,0	
		0,4		0,3
90	3,95		15,3	
		0,35		0,3
100	4,3		15,6	
		0,35		0,3
110	4,65		15,9	
		0,35		0,3
120	5,00		16,2	

3.5.3 Temperaturempfindlichkeit

Da die Versuche nicht in einer Klimakammer stattfinden konnten und während der Versuchszeit auch mit Temperaturänderungen der Haut zu rechnen ist, mußte auch zusätzlich zur Nullpunktkonstanz die Temperaturempfindlichkeit der Meßapparatur geprüft werden(38,52).

Geprüft wurde auf drei Arten:

Bei gleichem Versuchsaufbau (Kap.3.5.2) wurde die Raumtemperatur gehoben bzw. gesenkt (siehe Tab.4), um die Empfindlichkeit des gesamten Systems zu erkunden.

Die Temperatur des Glaszylinders wurde durch Einfüllen kalten bzw. warmen Wassers geändert, um die Empfindlichkeit der Meßfühler gegen Temperaturschwankungen des Beines herauszufinden.

Um die Beeinflußbarkeit der Meßfühler durch Luftzug zu erfahren, wurden beide auf dem leeren Glaszylinder belassen und zusammen gleichzeitig drei Minuten derselben Heißluft ausgesetzt.

Bei Raumtemperaturänderung zeigten beide Geräte gleiche Empfindlichkeit (Tab.4a,b). Auf Zylindertemperaturänderung erwies sich das Gerät "Periquant" nur geringfügig empfindlicher. Die "Periquant"-Fühler sind durch schlecht wärmeleitende Kunststoffstege von der Körperoberfläche getrennt, "Vasoscript" durch Leinen und Gummi. Beim Erhitzen mit Heißluft war "Periquant" mehr als dreimal empfindlicher. Ursächlich dafür ist, daß die zwischen den Kunststoffstegen frei liegenden Quecksilberschläuche Temperatureinflüssen rascher zugänglich sind als das durch Gummi und Leinenstoff besser geschützte Luftpolster.

Tabelle 4a Temperaturempfindlichkeit "Vasoscript"

Art der Temperaturänderung:	Temperatur (°C)		Änderung	Volumen (cm^3)	Vol/Grd.	Änderungs-Vol.Nullzeit(Min.)	korrektur	Vol/Grd. korrigiert	Vol/1oocm^3/Grd.
Raumtemperatur	17,5	auf 24,5	+ 7	+2,4	+0,34	30	3,25	o,46	0,14
	24,0	20,0	- 4	-1,9	-0,475	20	1,4	0,35	0,10
	20	23	+ 3	+1,1	+0,37	20	1,6	0,53	0,16
Temperatur des Glaszylinders	32	46	+14	+2,3	+0,16	10	2,55	0,18	0,05
	32	45	+13	+1,8	+0,14	20	2,3	0,18	0,05
	45	22,5	-22,5	-5	-0,22	20	4,5	0,20	0,06
Heißluft ca. 75°C				+2,6		3			0,78(Vol/1oocm^3)
Durchschnittliche Fehlanzeige bei Raumtemperaturänderung					0,395			0,447	0,133
Zylindertemperaturänderung					0,173			0,187	0,053

Tabelle 4b Temperaturempfindlichkeit "Periquant"

Art der Temperaturänderung:	Temperatur (°C)		Änderung	Volumen (cm^3/1oocm^3)	Vol/1oocm^3/Grd.	Vol./Grd.
Raumtemperatur	24	auf 20	- 4	-0,6	o,15	0,50
	20	17,5	-2,5	-0,35	0,14	0,47
	20	24	+ 4	+0,5	0,12	0,42
	24	19,5	-4,5	-0,55	0,12	0,4o
Temperatur des Glaszylinders	29	45	+16	+1,2	0,075	0,25
	45	22,5	-22,5	-1,6	0,07	0,23
Heißluft ca. 75°C				2,6		8.71(cm^3Vol.)
Durchschnittliche Fehlanzeige bei Raumtemperaturänderung					0,132	0,447
Zylindertemperaturänderung					0,0725	0,24

3.6 L a g e r u n g

Besonders wichtig bei der Plethysmographie ist die Lagerung des zu messenden Beines(23), insbesondere bei der Druck-Volumen-Schreibung die Höhe der Meßstelle.

Da sich die Versuchsperson mit leicht angewinkeltem Kniegelenk am entspanntesten zeigte (Venentonus, 23), wurde diese Beinstellung in der Höhe variiert. Abb.9 gibt als Beispiele die Kurven bei Fesselhöhen von 10 cm, 26 cm und 54 cm über der Liege wieder.

Bei 10 cm Fesselhöhe zeigt sich der Kurvenanstieg flach, der Knickpunkt undeutlich und nicht extrapolierbar. Die Druck-Volumen-Diagramme für Fesselhöhen über 25 cm (Abb.9, siehe auch Abb.12) zeigen einen parallelen Anstieg und deutliche Knickpunkte.

Um einen guten "Wasserfalleffekt"(50) und damit ein möglichst geringes mit und ohne Kompressionsstrumpf vergleichbares Grundvolumen zu erhalten, ist eine Mindestfesselhöhe von 25 cm erforderlich. Unter dieser Mindesthöhe bewirkt die zunehmende Restkapazität der Venen eine verminderte Volumenzunahme bei gleicher Staudruckzunahme. Die höhere Lagerung wirkt sich günstig auf die Druckfortleitung längs des venösen Systems aus, da die proximalen Gefäßabschnitte schon hydrostatisch bedingt gut entfaltet sind (Kap.3.2). Eine noch höhere Lagerung für ein durchgehend starkes Gefälle und eine bessere Entleerung der Wade ist möglich, jedoch auf Dauer nicht ratsam, da die Versuchsperson die bei höherer Lagerung notwendigen Staumanschettendrucke als unangenehm empfindet und des-

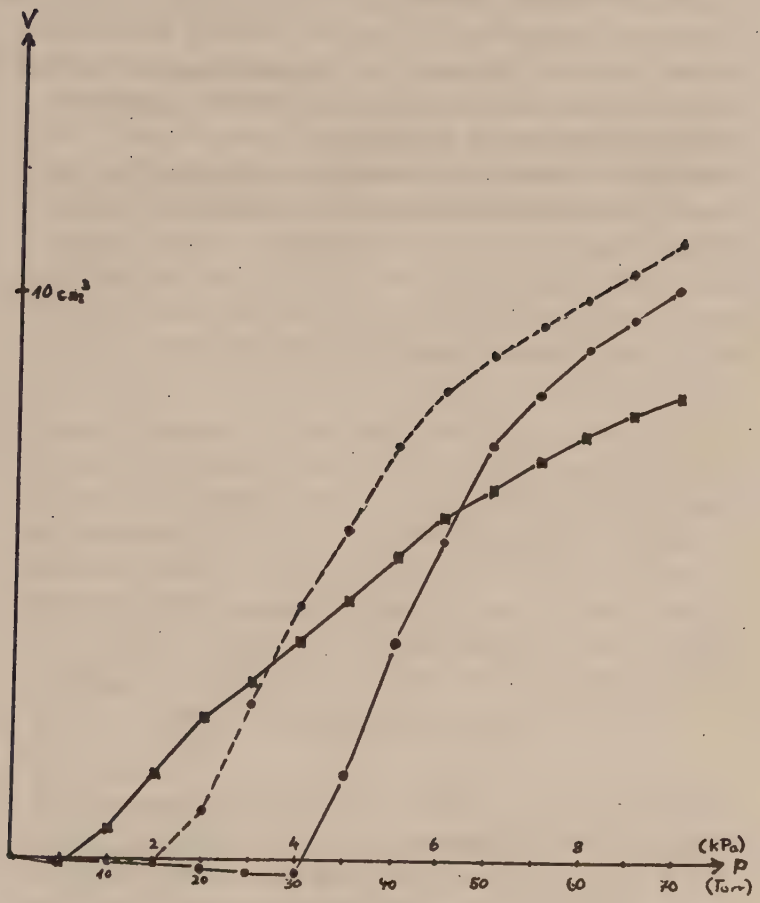


Abb. 9: Druck-Volumen-Diagramm der Fessel ohne Strumpf
10 cm mittlere Fesselhöhe über der Liege
26 cm mittlere Fesselhöhe über der Liege
54 cm mittlere Fesselhöhe über der Liege

halb die Entspannung darunter leidet. Auch klagt die Versuchsperson über ein "Einschlafen" des Beines wegen der schlechteren Durchblutung, da der arterielle Einstrom oberhalb 20 Torr (2,7 kPa) Staudruck zunehmend eingeschränkt wird(15,36,47). Zusätzlich würde sich die Meßdauer bei höheren Staudrucken verlängern, weil mehr Zeit bis zur Einstellung des Fließgleichgewichts vergeht.
Als günstig erschien deshalb eine Lagerung bei 37 cm mittlere Wadenhöhe und 45 cm mittlere Fesselhöhe.

4 Verfahren

Auf Grund der Voruntersuchungen wurde nun die Versuchsanordnung, Durchführung und Auswertung wie folgt festgelegt:

4.1 Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen sind so zu wählen, daß sich die Versuchsperson wohl fühlt, nicht schwitzt und nicht friert(77). Dies war je nach Bekleidung bei ca. 24°C der Fall. Die Temperatur ist konstant zu halten, Zug zu vermeiden (Kap.3.5.3). Störungen irgendwelcher Art sind von der Versuchsperson fernzuhalten wegen der sofortigen Tonusreaktion(85). Weitere strenge Versuchsbedingungen waren nicht notwendig.

4.2 Ankopplungsfaktor der Oberschenkelstaumanschette

An der liegenden Versuchsperson mißt man mit der Ultraschall-Doppler-Sonde den systolischen Blutdruck am Oberarm (P_{RR}). Der auf gleiche Art und Weise gemessene Druck mit der im proximalen Drittel des Oberschenkels angelegten Oberschenkelstaumanschette (12 cm breit) P_{SM}, der im allgemeinen höher liegt als P_{RR}, wird zur Berechnung des Ankopplungsfaktors

$$F_{AK} = \frac{P_{RR}}{P_{SM}}$$

benötigt (Kap.3.1).

4.3 Lagerung

Die Versuchsperson wird auf einer bequemen Liege flach gelagert. Nur das zu messende Bein liegt erhöht auf einer Braunschen Schiene. Die Braunsche Schiene wird so eingestellt, daß eine mittlere Wadenhöhe von 37 cm und eine mittlere Fesselhöhe von 45 cm über der Liege (Kap. 3.6) erreicht wird (Abb.10). Das Bein kommt auf der Braunschen Schiene nur mit der Ferse und dem lateralen Rand der Kniekehle zu

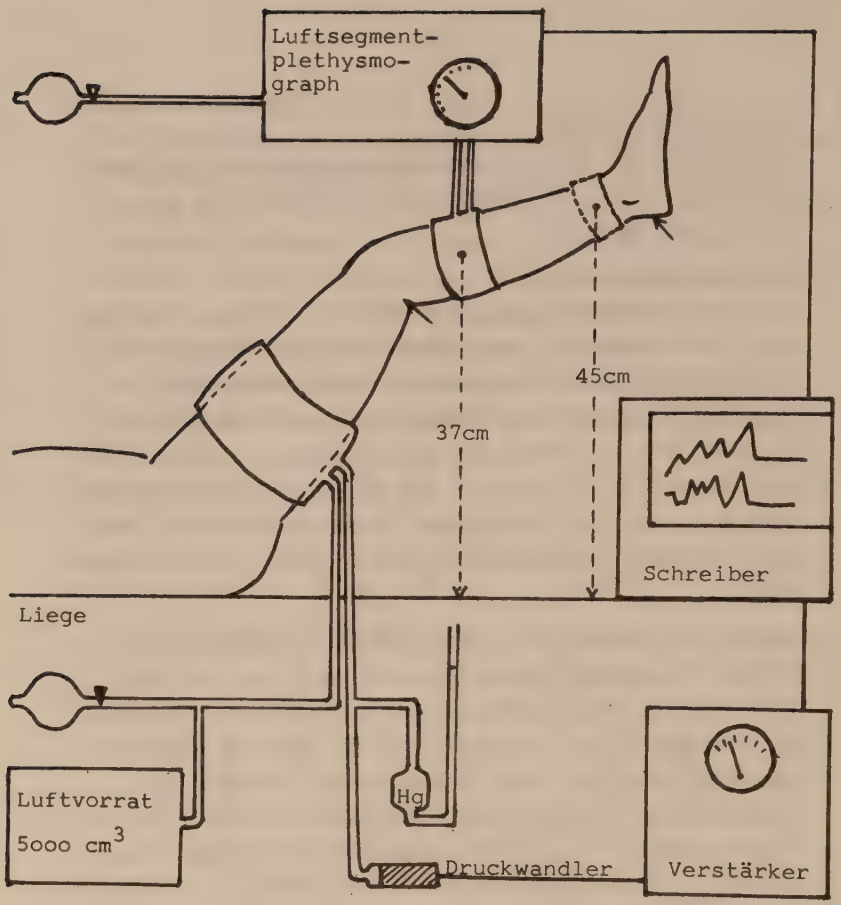


Abb. 10: Versuchsanordnung zur Aufzeichnung von Druck-Volumen-Diagrammen. -- zeigt die Auflagepunkte des Beines auf der Braunschen Schiene.

liegen. Gepolstert wird die Ferse wegen des besseren Halts mit einem Reissäckchen, das Caput fibulae mit Schaumgummi. Das Knie ist gebeugt und der Fuß leicht nach außen rotiert.

4.4 Volumenmessung

Die Volumenmeßmanschette (5 cm breit) des Luftsegmentplethysmographen wird an der Wade oder Fessel bei jeder Messung gleichmäßig zur Vermeidung eines Manschettenrandfehlers(12) angewickelt, die Manschette auf 30 Torr (4 kPa) aufgepumpt, um ein gutes Anliegen zu erzielen, und danach auf den Meßdruck (ein nach Instrumentenanzeige konstant bei sämtlichen Messungen einzuhaltender Druck von hier 12 Torr ≙ 1,6 kPa) eingestellt. Wenn der Plethysmograph ein hinreichend konstantes Volumen anzeigt (bis sich der Muskel- und Venentonus beruhigt hat und das gröbste Ödem abgelaufen ist, vergehen bis zu 25 Min.), wird nochmals auf den gewählten Meßdruck korrigiert und am geeichten Schreiber die Nullinie eingestellt mit einem Skalenbereich von -3 bis +10 cm^3. Danach beginnt mit der Stauung des venösen Abflusses die Messung, indem man bei gleichzeitiger Notierung des Staudrucks die Volumenänderung registriert (Abb.10,11).

4.5 Staudruck

Die Oberschenkelmanschette ist am proximalen Drittel des Oberschenkels angelegt. Das System, bestehend aus empfindlichem Druckmesser, Vorratsgefäß (zur besseren Feinabstimmung des Druckes) und Blasebalg eines Blutdruckmeßgeräts (Abb.10), wird in 5-Torr-Stufen (0,7 kPa Stufen) aufgepumpt. Man wartet nach jeder Druckerhöhung um 5 Torr (0,7 kPa), bis sich das Fließgleichgewicht zwischen zu- und abfließendem Blut und

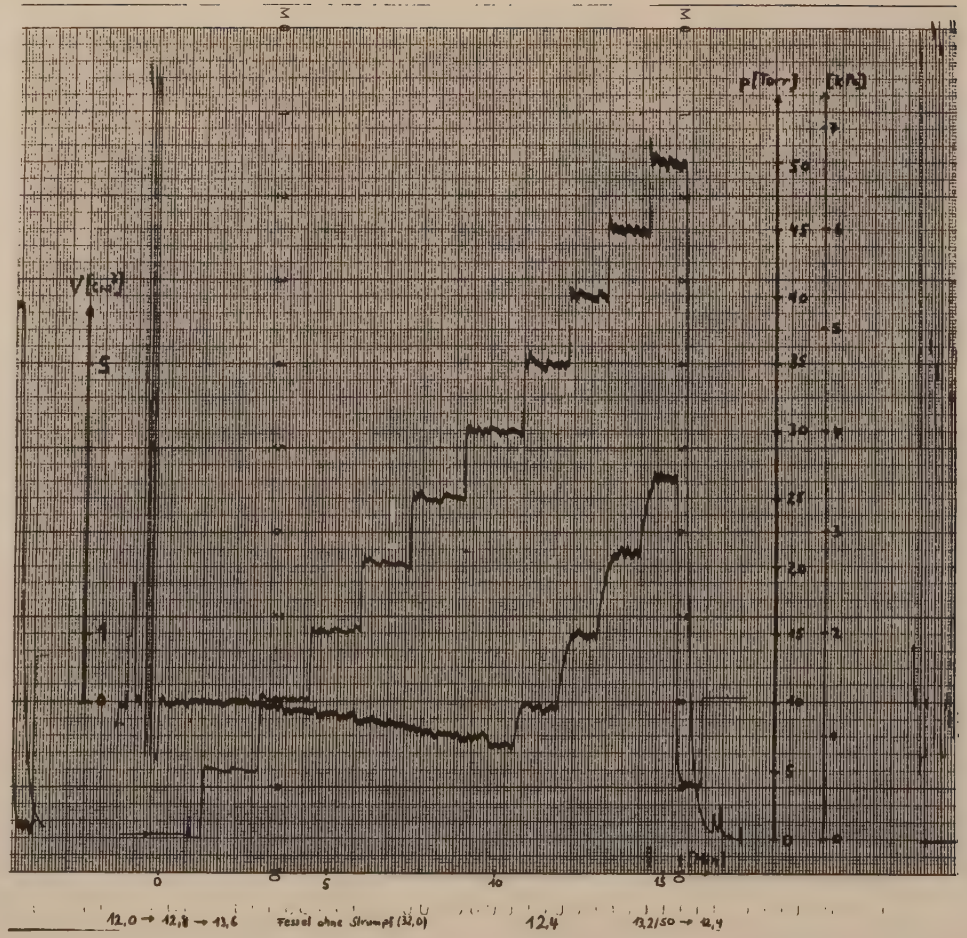


Abb. 11

Originalaufzeichnung
Fessel ohne Strumpf
obere, hohe Kurve:
Staudruck
untere, niedere Kurve:
Volumen

damit ein ablesbares Volumengleichgewicht eingestellt hat (bis zu 1,5 Min.). In dieser Zeit muß man Druckverluste (vorwiegend wegen Temperaturausgleich) durch Nachpumpen korrigieren. Nach erfolgter Volumenzunahme genügen 3 mal 5 Torr Staudruckzugabe. Zur Überwachung des Druckverlaufs kann dieser mitgeschrieben werden (Abb. 11).

4.6 Reihenfolge

Es empfiehlt sich mit den Messungen ohne Strumpf zu beginnen, da die Möglichkeit einer Kompressionswirkung bis zu 30 Min. nach dem Ausziehen nicht auszuschließen ist(72). Danach werden die Kompressionsstrümpfe gemessen, nach Möglichkeit die stärkstkomprimierenden zuletzt.

4.7 Auswertung

Die registrierten Zeit-Volumen,Druck-Diagramme (Abb. 11) werden umgeschrieben in Druck-Volumen-Diagramme (Abb.12). Verbindet man die Druck-Volumen-Meßpunkte ohne Volumenzunahme, ebenso die Meßpunkte nach Volumenzunahme, so ergeben sich zwei Geraden, die sich im definierten Kurvenknickpunkt schneiden. Der sich durch Differenzbildung der abgelesenen Schnittpunktsdrucke der Meßkurven ohne Strumpf P_{oS} und der Drucke am extrapolierten Kurvenknickpunkt mit Strumpf P_{mS} ergebende Druckbetrag entspricht nach Multiplikation mit dem Ankopplungsfaktor F_{AK} (Kap.3.1;4.2) der strumpfbedingten Gewebsdruckerhöhung P_S :

$$(P_{mS} - P_{oS}) \times F_{AK} = P_S$$

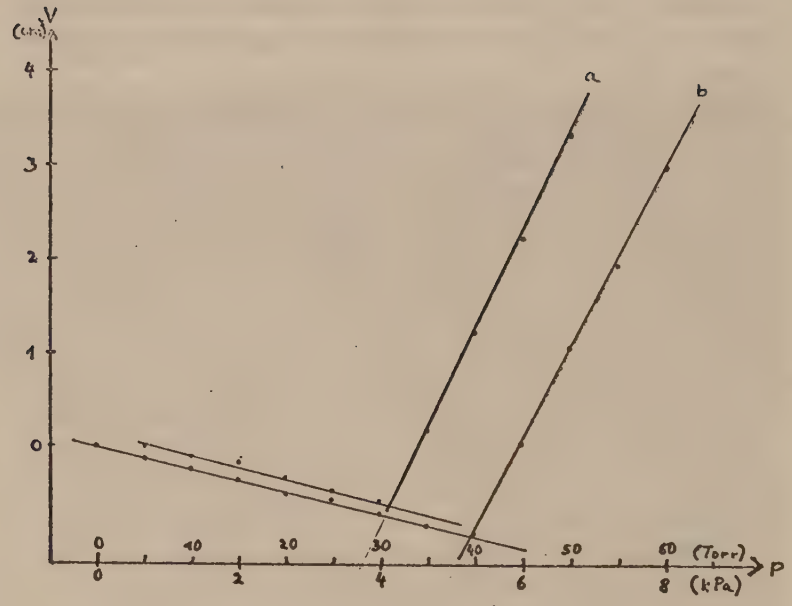


Abb.12: Druck-Volumen-Diagramm mit grafischer Extrapolation des Knickpunktes
a Kurve ohne Strumpf nach Abb. 11
b Kurve mit Strumpf III, jeweils Fessel
Bei Auswertung nach Kap.4.7 ergibt sich hier:
P_{mS}(39Torr)- P_{oS}(32Torr) = 7Torr
7 Torr x F_{AK}(0,79) = P_S(5,53)

5 Untersuchung des Verfahrens

Ein entscheidendes Kriterium jeder Meßmethode ist ihre Genauigkeit; dies bedeutet eine Überprüfung, ob die gesamte Meßanordnung, bestehend aus der Versuchsperson mit ihrem Bein, die Staudruckgebung und die Volumenanzeige zusammen genaue und konstante Meßergebnisse liefern, um den Vergleich der Druckwerte am Kurvenknickpunkt ohne und mit Strumpf zuzulassen.

Zur Überprüfung des gesamten Verfahrens wurden im Verlauf von zwei Monaten an elf Tagen je eine Fessel und je eine Wadenmessung ohne Strumpf nach Vorschrift von Kapitel 3 vorgenommen. Die Messungen ohne Strumpf fanden zu Beginn, während und am Ende einer Meßserie statt, um die maximale Streubreite zu erfassen. Zusätzlich wurde der Kurvenknickpunkt eines passenden Thromboseprophylaxestrumpfes I in je 5 Versuchen und jeweils neuem Anlegen von Strumpf und Meßgerät, in je 3 Messungen an einem weiteren Strumpf II bestimmt.

Die Ergebnisse der Bestimmung des Knickpunktes ohne und mit Strumpf sind in Tabelle 4 zusammengefaßt. Die Standardabweichung bei den 11 Versuchen ohne Strumpf beträgt abgelesen und ausgerechnet in Torr an der Fessel $s = 1{,}47$, der Stichprobenfehler $s_{\bar{x}} = 0{,}44$, der Variationskoeffizient $v = 4{,}96\%$. Für die Wade ergibt sich (in Torr): $s = 0{,}95$, $s_{\bar{x}} = 0{,}29$, $v = 4{,}2\%$. Auf kPa umgerechnet war an der Fessel $s = 0{,}196$, $s_{\bar{x}} = 0{,}059$, an der Wade $s = 0{,}127$, $s_{\bar{x}} = 0{,}039$. Bei den Versuchen an Strumpf I wurde gemessen in Torr

an der Fessel: $s = 1{,}3$, $s_{\bar{x}} = 0{,}58$, $v = 3{,}24\ \%$,

an der Wade : $s = 0{,}8$, $s_{\bar{x}} = 0{,}4$, $v = 2{,}1\ \%$,

Tabelle 4

Extrapolierte Knickpunktswerte

Ohne Strumpf:				Mit Strumpf I:			
	Fessel		Wade		Fessel		Wade	
n=	11		11	n=	5		5	
	(Torr)	(kPa)	(Torr) (kPa)		(Torr)	(kPa)	(Torr)	(kPa)
x=	29,5	3,93	24,0 3,20	x=	41,0	5,47	39,0	5,20
	28,0	3,73	22,5 3,00		41,5	5,53	39,0	5,20
	28,0	3,73	23,0 3,07		39,0	5,20	38,5	5,13
	32,0	4,27	20,5 2,73		39,5	5,27	37,0	4,93
	31,0	4,13	23,0 3,07		38,5	5,13	38,5	5,13
	28,0	3,73	22,5 3,00	Mit Strumpf II:				
	32,0	4,27	23,5 3,13		Fessel		Wade	
	30,0	4,00	22,5 3,00	n=	3		3	
	29,0	3,87	21,5 2,87	x=	38,5	5,13	32,5	4,33
	29,5	3,93	22,5 3,00		39,0	5,20	31,0	4,13
	30,0	4,00	22,0 2,93		39,0	5,20	31,5	4,20

Ohne Strumpf:				Mit Strumpf I:			
	Fessel		Wade		Fessel		Wade	
	(Torr)	(kPa)	(Torr) (kPa)		(Torr)	(kPa)	(Torr)	(kPa)
$\bar{x}$=	29,7	3,96	22,5 3,00	$\bar{x}$=	39,9	5,32	38,4	5,12
s=	1,47	0,196	0,95 0,127	s=	1,29	0,172	0,82	0,109
$s_{\bar{x}}$=	0,44	0,059	0,29 0,039	$s_{\bar{x}}$=	0,58	0,077	0,37	0,049
v=	4,96 %		4,22 %	v=	3,24 %		2,14 %	

Bezeichnet wurden mit x die extrapolierten Knickpunktswerte der Einzelmeßkurven, mit n die Anzahl der Meßwerte, mit $\bar{x}$ der arithmetische Mittelwert, mit s die Standardabweichung, mit $s_{\bar{x}}$ die Standardabweichung des Mittelwertes und mit v der Variationskoeffizient.

bzw. in kPa an der Fessel: $s = 0,17$, $s_{\bar{x}} = 0,077$
und an der Wade: $s = 0,10$, $s_{\bar{x}} = 0,05$.
In dieser Gesamtstreuung sind sowohl methodisch bedingte Meßfehler als auch zum überwiegenden Anteil individuelle Tagesschwankungen des Muskel und Venentonus der Versuchsperson(5,9,65,80) enthalten. Dafür spricht auch, daß die Standardabweichung des Druckes unter dem Strumpf mit 1,3 Torr (0,17 kPa) an der Fessel und 0,8 Torr (0,10 kPa) an der Wade trotz der weiteren erheblichen Schwankungsmöglichkeiten z.B. durch den ungleichen Sitz des Strumpfes(18,45,55,75) geringer ausfällt. Diese durch Strumpf II bestätigte Tendenz ist wahrscheinlich auf den geringer ins Gewicht fallenden Muskeltonus (subjektives Empfinden der Versuchsperson) und Venentonus(37) sowie auf das gleichmäßig ausgepreßte Grundvolumen (Kap.3.5.1; 3.6) zurückzuführen.
Diese Methode der Druck-Volumen-Messung erlaubt erstmalig präzise Aussagen über die Druckwirkung von Kompressionsstrümpfen auf das Venensystem. Sämtliche bekannten Meßverfahren lassen nur Aussagen über den äußeren Andruck zu. Prinzipiell lassen sie sich in zwei Kategorien unterscheiden: Die einen messen Umfangsspannungen und den direkt über eine einfache den durchschnittlichen Beinradius beinhaltende Funktion zusammenhängenden Druck(40,48, 61,75,78). Die anderen Verfahren messen den Andruck punktuell und bestätigen hiermit, daß der Andruck eine Funktion der komplexen Krümmungsradien ist(21, 22,27,76,78). Wie sich aber der Druck durch das Gewebe fortpflanzt, wieviel des äußeren Drucks in Cutis und Subcutis hängenbleibt, welche Widerstände der Muskeltonus der Druckfortpflanzung entgegensetzt, wie sich der krümmungsradiusabhängig unter-

schiedliche Andruck verteilt, ob nicht Knochen und Sehnen die Druckeinflüsse auf die Tiefe verhindern, dafür gibt es in Ermangelung von Stoffkonstanten nach Gesetzen der Statik in Abhängigkeit von der Spannung im Strumpfgestrick bzw. vom äußeren Andruck noch keine Lösung. So ist es durchaus möglich, daß sich das äußere Druckgefälle von distal nach proximal, das inzwischen sämtliche Strumpfhersteller als notwendig erkannt haben(40), trotzdem in den tieferen Schichten umkehrt(18) und damit anstatt der gewünschten Erleichterung des Abflusses eine Stauung bewirkt.

Diese Lücke zwischen Strumpfandruck und Druckwirkung auf das venöse System überbrückt die Druck-Volumen-Messung, da nur sie vom Erfolgsorgan aus mißt.

Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen mit Druck-Volumen-Messung(8,9,11,13,29,30,52,59,60,66,68) wurde das Elastizitätsverhalten des venösen Systems nicht ermittelt, sondern im Gegenteil als Störfaktor betrachtet. Die Messungen werden in dem niederen Druckbereich durchgeführt, in dem sich das venöse System den geringfügig veränderten Drücken durch einfaches Auffüllen der kollabierten Gefäße, die im wesentlichen durch die hohe Lagerung bedingt sind, anpaßt(11). Die Gefäße füllen sich bei Drosselung des Abflusses an Stellen mit niedrigem Gewebsdruck zuerst und entfalten sich bei höheren Staudrucken auch am Ort höheren Gewebsdruckes. So erhält man nach dem Knickpunkt einen hinreichend linearen Kurventeil (Abb.12), dessen Neigung dem langsamen Auffüllen des venösen Systems von innen nach außen gegen den Kompressionsdruck entspricht.

In die Druck-Volumen-Kurve mit Kompressionsstrümpfen geht auch die Dehnungsqualität des Strumpfgestricks bzw. des Gewebes mit ein(8,11,63,64). Folgt die Strumpfelastizität dem Hookschen Gesetz (wie die zahlreichen Kraft-Dehnungs-Diagramme zeigen, ist dies für den Gültigkeitsbereich der Fall), so ändert sich an der Linearität der Anstiegskurve nichts, und sie kann wie die Kurve ohne Strumpf zur Extrapolation des Knickpunktes herangezogen werden.
Der Elastizitätsmodul bei Strümpfen der Kompressionsklasse I bzw. zur Thromboseprophylaxe (Gummielastizität) ist derart gering, daß sich nur noch eine quantitative Verschiebung der Kurve ergibt(64). Dies ist nicht verwunderlich, wenn man bedenkt, daß während einer Messung an einem durchschnittlichen Thromboseprophylaxestrumpf der Andruck von 14,0 auf 14,8 Torr (1,87 auf 1,97 kPa) zunimmt (Bsp. aus Kap. 3.3). Wie jeder Meßfühler beeinflußt auch die Volumenmeßmanschette das Meßobjekt. In diesem Falle hat jedoch der Andruck der Volumenmeßmanschette den günstigen Effekt, eine gute Druckleitung (Kap.3.2), gleiche venöse Ausgangsverhältnisse (Kap.3.5.1) und einen guten Kontakt mit dem Meßobjekt (Kap.3.5.1) zu gewährleisten. Der ungünstige Effekt, daß ein Anteil des Meßmanschettendrucks mitgemessen wird, eliminiert sich bei der Differenzbildung der Knickpunktsdrucke mit und ohne Strumpf, da man annehmen kann, daß bei peinlich genau gleichem Anlegen (gleicher Druck, gleich breite Auflagefläche(12,16) und gleiche Höhe der Manschette) die Druckwirkung des Meßfühlers gleich ist.
Zur einfachen automatischen Registrierung ist die Nullmethode(8), bei der der Druck in der Meßman-

schette (unter Veränderung der Auflagefläche(16)) laufend von Hand auf den Ausgangsdruck reduziert wird, nicht anwendbar. Der Druck steigt im Verlauf der Messung hinreichend linear um rund 1 Torr (0,13 kPa) je cm^3 Volumenzunahme an. Ein auf der aktiven Seite des Differenzialmanometers eingeschaltetes Kontrollmanometer zeigte bei Messungen an der Fessel eine Druckzunahme von 10 auf 12,5 Torr (1,3 auf 1,7 kPa), an der Wade von 10 auf 15 Torr (1,3 auf 2,0 kPa). Auch diese Druckzunahme in der Meßmanschette verändert ausschließlich die Steilheit der Kurve, nicht jedoch den Druckwert des Kurvenknickpunktes.

Die reine Druck-Volumen-Kurve (Abb.11) wird von Wellen 1. Ordnung (Puls), 2. Ordnung (Atmung) und 3. Ordnung (spontane Eigenrhythmik) überlagert(58). Dies erschwert zunächst das Abschätzen, ob das Fließgleichgewicht erreicht ist und auf welchem Druckniveau es sich befindet. Bei der automatischen Registrierung (Abb.10) sieht der Untersucher die Volumenzunahme und die Schwankungen durch Überlagerung und kann nach Abwarten einiger Atemzüge durch bequemes graphisches Ausmitteln auf 0,5 Torr (0,06 kPa) genaue Druckwerte ablesen, die zur Extrapolation des Knickpunktes wichtig sind. Betrachtet man ausschließlich den Druckwert des Knickpunktes, wie es bei dieser Methode geschieht, entfallen zwei weitere Störfaktoren: Das Beinödem und die Nulliniendrift, die beide sichtbar die Druck-Volumen-Kurve überlagern (Abb.11). Da jedes Bein auch nach Abfließen des labilen Ödems noch ein physiologisches Quellödem besitzt, das unter Kompression stundenlang abnimmt(31,32), würde die

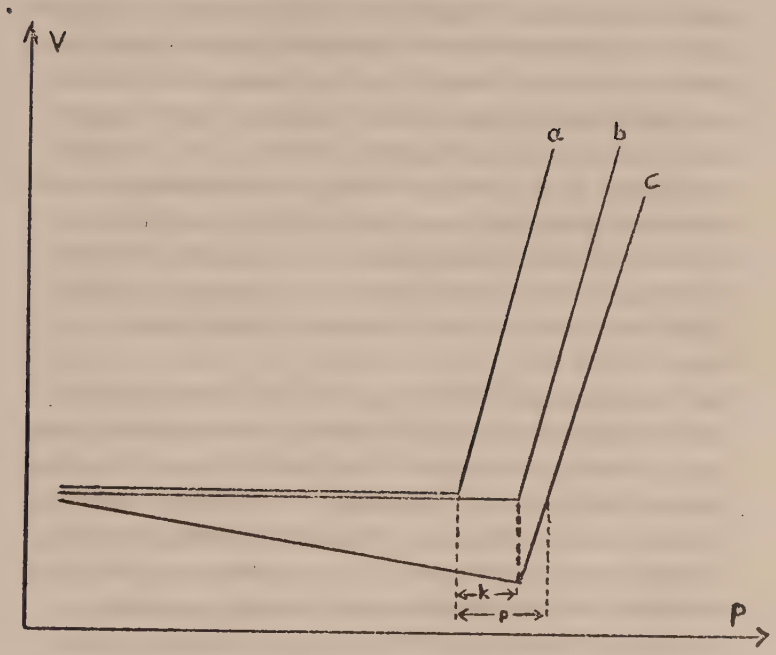


Abb. 13: Schematische Darstellung der Auswirkung von Beinödem bzw. Nulliniendrift
a : Kurve ohne Strumpf ohne Volumensabnahme
b : Kurve mit Strumpf ohne Volumensabnahme
c : Kurve mit Strumpf mit Volumensabnahme
k : Druckdifferenz der Knickpunkte
p : Parallelverschiebung der Kurve c

reine Betrachtung der Parallelverschiebung zu hohe scheinbare Andruckwerte liefern (Abb.13). Da die Nullpunktsdrift denselben Effekt besitzt, erscheint es sinnvoll, nur den Druckwert des extrapolierten Kurvenknickpunktes zu verwenden.

Zur präzisen Ermittlung des Kurvenknickpunktes werden die vier vor und nach dem Knickpunkt liegenden Druck-Volumen-Werte herangezogen und durch eine Gerade verbunden. Nimmt man als Kurvenknickpunkt den Schnittpunkt der beiden Geraden, gehen außer den knickpunktsbenachbarten Punkten auch in abgeschwächter Form die die Steigung bestimmenden drei knickpunktsfernen Punkte mit in die Druckbestimmung ein. Dadurch wird erreicht, daß die Methode über die von den Druckstufen vorgegebenen 5 Torr (0,67 kPa) hinausgehend genauere Werte liefern kann.

Das Verfahren ist unblutig und beeinträchtigt die Versuchsperson nicht. Der wesentliche Nachteil ist jedoch der Zeitaufwand: Um an einer neuen Versuchsperson überhaupt ein Ergebnis zu bekommen, ist vom Lagern über die Eichung, Bestimmung des Ankopplungsfaktors, Leermessung, Strumpfmessung und Kurvenauswertung mindestens eine Stunde notwendig. Sind der Ankopplungsfaktor und die Meßwerte ohne Strumpf bekannt, läßt sich in je 15 Minuten ein weiterer Meßwert mit einer Genauigkeit von ± 2 Torr (0,27 kPa) ermitteln. Versucht man aus Gründen der Zeitersparnis den Kurvenknickpunkt unter Vernachlässigung der geraden Kurvenanteile direkt zu finden, sinkt die Genauigkeit drastisch; die rasche fortlaufende Registriermethode(60) liefert bei der angegebenen Lagerung (Kap.4.3) zu hohe

Druckwerte, da sich das Gleichgewicht nicht genau einstellen kann. Weitere Untersuchungen an anderen Personen können zeigen, ob eine weitere Zeitersparnis möglich ist; so wäre denkbar, daß durch peinlich genaue Einhaltung der Stau- und Meßmanschettenhöhe die Leermessung ohne Strumpf, eventuell unter Verwendung eines weiteren Korrekturfaktors für die Volumenmeßmanschette, entfallen kann, wenn sich herausstellt, daß der Leerwert im wesentlichen nur höhendifferenzabhängig ist.

Dieses hier vorgestellte Verfahren kann mehr noch als ähnliche den Druckverlauf durch die Schichten des Beines berücksichtigende Verfahren(8,11,60, 63,64) den Wert der äußeren Andruckmessung steigern. Erst wenn der Druckverlauf unter der Oberfläche bekannt ist, kann der Wert des äußeren Andrucks zur Beeinflussung der Vorgänge in der Tiefe beurteilt werden. Der vom Erfolgsorgan aus gemessene Druck muß eine Grundlage zur geforderten Modifikation(14) der gegenwärtig gültigen Normen zur Strumpfherstellung(40) sein; auch zur Erstellung einer Norm für Thromboseprophylaxestrümpfe ist die Kenntnis der Druckwirkung auf die Blutgefäße und die daraus resultierende Änderung der Hämodynamik unumgänglich. Einen Beitrag dazu liefert dieses Verfahren.

6 Zusammenfassung

Die Methode der Druck-Volumen-Messung zur Erfassung exakter Druckgrößen der Kompressionsstrumpfwirkung auf das venöse System wird erstmals beschrieben und begründet. Die globale Andruckwirkung in einem bestimmten Beinsegment entspricht der Differenz der mit und ohne Strumpf gewonnenen Druckwerte der Kurvenknickpunkte, die sich deutlich darstellen, wenn der von innen her durch Abflußstauung erzeugte Druck im Venensystem den durch äußere Kompression erzeugten Gewebsdruck übersteigt. Die Methode eignet sich vor allem für die unblutige Kontrolle des von Strümpfen auf tiefer liegende Venen ausgeübten Druckes und des Druckgefälles in der Tiefe.

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

1. Adam, W., Barbey, K., Oehmichen, Ch.:
Die Druckmessung unter dem Gummistrumpf
Zbl. Phleb. 3,:170-182 (1964)

2. Anschütz, F., Burkert, E.:
Der Fehler der auskultatorischen Blutdruckmessung nach Riva-Rocci / Korotkoff an umfangreichen Weichteilen
Z. Kreisl.-Forsch. 43,: 335-343 (1954)

3. Arnoldi, C.C.:
Effekten af elastisk kompression på strømningshastigheden i laeggens dybe vener
Ugeskr. Laeg. 138,: 275-278 (1976)

4. Arnoldi, C.C.:
Elastic compression in the prevention of venous thrombosis
Vasa 5,: 101-106 (1976)

5. Atzler, P., Herbst, H.:
Schwankungen der Fußvolumina und deren Beeinflussung
Z. ges. exp. Med. 37/38,:137-152 (1923)

6. Aussum, J.-F.:

Der passende Kompressionsstrumpf

Carl Winter Verlag, Heidelberg 1965

7. Aussum, J.-F.:

Die Druckmessung am Kompressionsstrumpf

Münch. med. Wschr. 44,:2195-2201 (1965)

8. Barbey, K., Adam, W.:

Eine Methode zur Messung von Druck-volumendiagrammen am Bein

Arch.klin.exp.Derm. 222,:423-429 (1965)

9. Barbey, K., Adam, W.:

Die Messung von Druckvolumendiagrammen am Bein. I. Zur methodischen und individuellen Streubreite und deren Ursachen.

Arch.klin.exp.Derm. 222,:574-579 (1965)

10. Barbey, K., Barbey, P.:

Ein neuer Plethysmograph zur Messung der Extremitätendurchblutung

Z. Kreisl.-Forsch. 52,:1129-1140 (1963)

11. Barbey, K., Brecht, K.:

Venentonus, Venenkapazität und ihre Messung

Med. Welt 15,: 727-732 (1965)

12. Barbey, K., Marées, H. de :

Grenzen der Luft- und "Strain-gauge"-Plethysmographie

in: Ehringer, H., Deutsch, E.: Durchblutungsstörungen, Meßmethodik und Pharmakotherapie : 59-70 Schattauer Verlag, Stuttgart 1970

13. Barbey, K., Marées, H. de :

Die Messung der druckabhängigen venösen Kapazität

in: May, R. Meßmethoden in der Venenchirurgie :130-137 Hans Huber Verlag, Bern 1971

14. Bernink, B. P.:

Elastische Strümpfe und ihre Qualitätsbeurteilung. Einige Thesen

Medita 8, :152-157 (1978/3a)

15. Bethge, K.-P., Caleya, D. de, Barbey, K.:

Methodische Aspekte zur pneumatischen Segmentplethysmographie. II. Das Problem der Staumanschettenbreite und des Staumanschettendrucks

Z. Kardiol. 64,:636-646 (1975)

16. Bethge, K.-P., Caleya, D. de :

Methodische Aspekte zur pneumatischen Segmentplethysmographie. III. Das Meßmanschettenproblem

Z. Kardiol. 65,:743-751 (1976)

17. Bodle, M.:

Druckverlauf und Strömungsgeschwindigkeit in Beinvenen unter Thromboseprophylaxestrümpfen

Inauguraldissertation, Tübingen (1980) (im Druck)

18. Bodle, M., Ebert, H.-M., Fischer, H.:

Vorläufige Ergebnisse einer volumetrischen Bestimmung des Andruckes von Kompressionsstrümpfen

Medita 8, :72-77 (1978/3a)

19. Bollinger, A.:

Durchblutungsmessungen in der klinischen Angiologie

Hans Huber Verlag, Bern 1969

20. Borgnis, F., Bruyne, P. de, Dvořák, T.:

A simple direkt method for the measurement of compression in support hose and of bandages

Medita 8, :67-71 (1978/3a)

21. Bruyne, P. de :

Measurement results obtained by direct and indirect methods indicating pressures exerted by elastic stockings

Medita 8, :96-100 (1978/3a)

22. Bruyne, P. de, Dvořák, T.:

The pressure exerted by an elastic stocking and its measurement

Medical and Biological Engineering :94-96 (Jan.1976)

23. Caleya, D. de, Bethge, K.-P., Barbey, K.:

Methodische Aspekte zur pneumatischen Segmentplethysmographie. I. Das Problem der Lagerung und der distalen venösen Okklusion

Z. Kardiol. 64,:625-635 (1975)

24. Dohn, K.:

Funktional plethysmography in disturbances of the circulation following poliomyelitis

Acta orthop. scand. 22,: 337-346 (1953)

25. Dohn, K.:

Plethysmographs usable during funktional states recording volume changes in ml per 100 ml of extremity

Rep. Steno. Hosp. (Kbh.) 6, :147-168 (1956)

26. Fentem, P.H., Goddard, M., Gooden, B.A.:

Support for varicose veins

Brit. Med. J. :254-256 (1976/1)

27. Fentem, P.H., Goddard, M.:

A comparison of a direkt and an indirekt method of measuring the compression provided by support hosery

Medita 8,:90-95 (1978/3a)

28. Fischer, H.:

Rehabilitationsprogramm bei Venenerkrankungen

Z.f.Phys.Med. 5,: 185-139 (1976)

29. Fischer, H.:

Zum klinisch-experimentellen Wirkungsnachweis einer lokalen Digitoxintherapie bei chronischer Veneninsuffizienz

Med. Welt 27(N.F.),:2491-2494 (1976)

30. Fischer, H., Barbey, K.:

Die Extremitätendurchblutung beim varikösen Symptomenkomplex

Arch.klin.exp.Derm. 224,:402-407 (1966)

31. Fischer, H., Müller, R.:

Quantitative und qualitative Ödemmessung

Med. Welt 22,: 312-314 (1971)

32. Fischer, H., Müller, R.:

Ergebnisse der quantitativen und qualitativen Ödemmessung

Folia Angiologica 20,:180-184 (1972)

33. Fischer, H., Müller, R.:

Meßmethoden zur Untersuchung des Venensystems

Z. Haut-Geschl. Kr. 47,:453-461 (1972)

34. Flögel, L.:

Die Bedeutung der Staumanschettenbreite für die Blutdruckmessung an umfangreichen Weichteilen nach Riva-Rocci/Korotkoff

Inauguraldissertation Tübingen 1976

35. Graf, K.:

Auswertung und Meßfehler okklusions-plethysmographischer Durchblutungs-registrierungen

Acta physiol. scand. 60,:120-132 (1963)

36. Graf, K., Rosell, S.:

Zur Wirkung subdiastolischer Okklusions-drucke auf die distale Extremitäten-durchblutung

Acta physiol. scand. 61,:357-375 (1964)

37. Graf, K., Rosell, S.:

Der Effekt plethysmographischer Füllungs-drucke bis 20 cm H_2O auf die lokale Ex-tremitätendurchblutung

Acta physiol. scand. 62,:323-353 (1964)

38. Graf, K., Westersen, A.:

Untersuchungen über Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten eines flexiblen Extremitätenplethysmographen

Acta physiol. scand. 46,: 1-18 (1959)

39. Gülker, H.:

Untersuchungen zur Reproduzierbarkeit der quantitativen Ödemmessung mit dem Luftsegmentplethysmographen

Inauguraldissertation Tübingen 1973

40. Gütezeichengemeinschaft Medizinische Gummistrümpfe e.V., Köln:

Gütesicherung RAL - RG 387

Beuth Verlag, Berlin,Köln 1976

41. Gutmann, J.:

Pers. Mitteilung zum Anlagedruck vom 25.10.1977

42. Gutmann, J., Krötz, J.:

Zur Genauigkeit der Dehnungsmeßstreifenmethode bei der venösen Kapazitätsmessung

Folia Angiologica 20,:103-107 (1972)

43. Haid, H.:

Meßergebnisse des Andrucks von Verbänden und Kompressionsstrümpfen verschiedener Materialien

In: Teller, H.:
Ergebnisse der Angiologie, Bd. 4
XIII. Int. Kongreß vom 11.-13.9.69 in Berlin der Dtsch. Arbeitsgem. f. Phlebologie
Schattauer Verlag, Stuttgart 1970

44. Haid, H., Hinger, K.-J.:

Messungen des Andrucks von Verbänden und Gummistrümpfen

In: May, R.:
Meßmethoden in der Venenchirurgie :248-254 Hans Huber Verlag, Bern 1971

45. Haid, H., Schoop, W.:

Eine neue Methode zur Messung und Registrierung des Andrucks unter Kompressionsverbänden

Med. Welt 17,:2110-2113 (1965)

46. Haid-Fischer, F., Haid, H.:

Venen - Fibel

Georg Thieme Verlag, Stuttgart 1965

47. Halperin, M.H., Friedland, C.K., Wilkins, R.W.:

Effect of local compression upon blood flow in extremities of man

Amer. Heart J. 35,:221-237 (1948)

48. Horner, J., Lowth, L.C.:

A pressure profile for graduated compression stockings

Medita 8, :158-165 (1978/3a)

49. Kappert, A.:

Eine neue Methode zur funktionellen Untersuchung des Venensystems der unteren Extremitäten. Anwendung in der Diagnostik und Therapieüberwachung

Praxis 55,:1291-1296 (1966)

50. Leu, H. J.:

Die moderne meßtechnische Beurteilung venöser Erkrankungen

Med. Welt 41,:2242-2248 (1969)

51. Leu, H. J.:

Die Dehnungsmeßstreifen-Plethysmographie

In: May, R.:
Meßmethoden in der Venenchirurgie :163-171 Hans Huber Verlag, Bern 1971

52. Marées, H. de, Barbey, K.:

Die Messung kompletter Druck-Volumen-Diagramme

In: May, R.:
Meßmethoden in der Venenchirurgie :137-143 Hans Huber Verlag, Bern 1971

53. Matis, P., Pauschinger, P., Fischer, H.:

Bedeutung und Bekämpfung der post-operativen Zirkulationsverlangsamung in der unteren Extremität

Med. Welt 24,:349-352 (1973)

54. Molen, H.R.van der :

Über Druckmessungen an Unterschenkel-verbänden bei chronischer Insuffizienz der venösen und lymphatischen Zirkulation

Med. Welt 21,:1697-1699 (1960)

55. Molen, H.R.van der :

Gummistrumpfprobleme

In: Teller, H.:
Ergebnisse der Angiologie, Bd. 4
XIII.Int. Kongreß vom 11.-13.9.69
in Berlin der Dtsch. Arbeitsgem. f. Phlebologie
Schattauer Verlag, Stuttgart 1970

56. Mühe, E.:

Die Wirkung von elastischen Verbänden auf die venösen Srömungsgeschwindigkeiten in der postoperativen Thromboseprophylaxe

Krankenhausarzt 47,:265-272 (1974)

57. Mühe, E., Bayer, F.:

Elastische Binden oder Strümpfe zur Thromboseprophylaxe ?

Klinikarzt 5,:177-184 (1976)

58. Müller-Wiefel, H.:

Ergebnisse der Angiologie Bd. 7
Untersuchungen zur Hämodynamik in Venen der unteren Extremität.
Physiologische und pathophysiologisch-klinische Aspekte

Schattauer Verlag, Stuttgart 1974

59. Nill, H.J., Fischer, H.

Vergleichende Untersuchungen zur Beeinflussung des Druck-Volumen-Diagramms durch Roßkastanienextrakt bei Venenkranken

Ärztl. Forsch. 24,:141-143 (1970)

60. Pauschinger, P., Rieckert, H.:

Eine Methode zur fortlaufenden Registrierung der Druck-Volumen-Schleife am Menschen

Ärztl. Forsch. 22,:181-185 (1968)

61. Peat, D.:

The hatra hose pressure tester

Medita 8,: 78-83 (1978/3a)

62. Pernkopf, E.:

Atlas der topographischen und angewandten Anatomie des Menschen Bd.II

Urban u. Schwarzenberg, München 1964

63. Pütter, S.:

Untersuchungen über den Charakter und Effekt verschiedener Kompressionsmethoden bei chronisch venöser Insuffizienz

Inauguraldissertation Tübingen 1969

64. Pütter, S., Fischer, H., Schneider, W.:

Untersuchungen über verschiedene Kompressionsmethoden bei chronisch-venöser Insuffizienz

Arch.klin.exp.Derm. 238,:242-257 (1970)

65. Rein, H., Schneider, M.:

Physiologie des Menschen

14.Aufl. Springer Verlag, Berlin 1960

66. Rieckert, H.:

Die Hämodynamik des venösen Rückflusses aus der unteren Extremität. Ein Beitrag zur Methodik und Physiologie

Arch. Kreisl. Forsch. 62,:293-318 (1970)

67. Rieckert, H., Pauschinger, P.:

Fortlaufende Druck-Volumenschreibung des kapazitiven Gefäßgebietes am Menschen

Pflügers Arch. ges. Physiol. 300,:63-64 (1968)

68. Scheppokat, K.D., Thron, H.L., Gauer, O.H.:

Quantitative Untersuchungen über Elastizität und Kontraktilität peripherer menschlicher Blutgefäße in vivo

Pflügers Arch. ges. Physiol. 266,:130-149 (1958)

69. Schmitz, R.:

Grundsätzliches zur Ausführung phlebologischer Kompressionsverbände mit verschiedenen Verbandmaterialien

In: Teller, H.:
Ergebnisse der Angiologie, Bd. 4
XIII. Int. Kongreß vom 11.-13.9.69 in Berlin der Dtsch. Arbeitsgem. f. Phlebologie :145-155
Schattauer Verlag, Stuttgart 1970

70. Sievers, U., Stenger, E.:

Thromboseprophylaxe, Varizen, Ödeme - Indikationen für Konfektions-Kompressionsstrümpfe ?

Münch. med. Wschr. 118,:1135-1138 (1976)

71. Sigel, B., Edelstein, A.L., Felix, W.R., Memhardt, Ch.R.:

Compression of deep venous system of the lower leg during inactive recumbency

Arch. Surg. 106,:38-43 (1973)

72. Sigel, B., Edelstein, A.L., Savitch, L., Hasty, J.H., Felix, W.R.:

Type of compression for reducing venous stasis

Arch. Surg. 110,:171-175 (1975)

73. Sigg, K.:

Varizen, Ulkus cruris und Thrombose

4. Aufl. Springer Verlag, Berlin 1976

74. Sigg, K., Fuhrmann, P.:

Messung des Kompressionsdruckes bei Kompression mit Verbänden und Gummistrümpfen

Zbl. Phlebol. 3,:244-254 (1964)

75. Stolk, R.:

Der physische Begriff: Druck der therapeutischen Kompressionsstrümpfe

Medita 8,:56-61 (1978/3a)

76. Stolk, R.:

Druckmessung der elastischen Kompressionsstrümpfe

Medita 8, :62-66 (1978/3a)

77. Thron, H.L., Scheppokat, K.D., Heyden, A., Gauer, O.H.:

Das Verhalten der kapazitiven und der Widerstandsgefäße der menschlichen Hand in Abhängigkeit von thermischen Einflüssen

Pflügers Arch. ges. Physiol. 266,:150-166 (1958)

78. Weber, G., Göhr, O.:

Methoden der Kompressionsmessung an elastischen Strümpfen - Ein kritischer Überblick

Medita 8, :21-27 (1978/3a)

79. Whitney, R.J.:

The measurement of volume changes in human limbs

J. Physiol.(London) 121,:1-27 (1953)

80. Witzleb, E.:

Über den Venentonus

Med. Welt 17,:1843-1847 (1966)

L E B E N S L A U F

Hans-Martin Ebert

7.März 1948	geboren in Stuttgart als 3.Sohn des selbständigen Kaufmanns Arthur Ebert und seiner Ehefrau Anna-Luise, geb. Liebermann.
1954	Grundschule (Falkertschule Stuttgart)
1958	Dillmann Gymnasium Stuttgart, Abitur Okt.1966
Okt. 1966	Chemiestudium mit Vordiplom an der Technischen Universität Stuttgart bei gleichzeitiger Tätigkeit in der Firma meines Vaters, der infolge eines Unfalls die Berufstätigkeit aufgeben mußte
März 1974	Medizinstudium an der Universität Stuttgart-Hohenheim
April 1975	Wechsel an die Universität Tübingen
März 1976	Ärztliche Vorprüfung
März 1977	Erster Abschnitt der Ärztlichen Prüfung Beginn der Dissertation. In den Jahren 1977,78 tätig als Tutor für das Studentenwohnheim"Geigerle"
März 1979	Zweiter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung Praktische Ausbildung im Robert-Bosch-Krankenhaus, Stuttgart
Sept.1979	Senator Pütter Preis, verliehen von der Deutschen Gesellschaft für Phlebologie und Proktologie für die gemeinsam mit Herrn M.Bodle vorgelegte Arbeit "Das Verhalten des Venendrucks im Fuß bei dosierter isolierter und kombinierter Kompression von Ober- und Unterschenkel"
22.April 1980	Dritter Abschnitt der Ärztlichen Prüfung, Approbation als Arzt

Offsetdruck Spengler
Lessingstraße 4 · 7401 Neustetten 1
Telefon (07472) 22145